

文章编号:1007-9629(2023)11-1214-06

碱激发体系凝结时间和早期抗压强度变化规律

郑蕻陈, 刘琳*

(河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210024)

摘要:系统研究了以 NaOH、水玻璃以及 NaOH 复掺 Na_2CO_3 为激发剂, 激发矿渣、粉煤灰、矿渣/粉煤灰和矿渣/水泥 4 种胶凝体系的凝结时间和 7 d 抗压强度变化规律, 获得了凝结时间与掺量变化公式及早期抗压强度预测公式。结果表明: 单一 NaOH 或水玻璃激发矿渣条件下, 掺入少量粉煤灰、水泥对改善复掺体系凝结时间的效果不显著, 并且均会降低早期抗压强度; 采用 NaOH/ Na_2CO_3 复合激发剂后, 能够有效延长体系凝结时间, 在一定程度上提高体系抗压强度。针对 NaOH/ Na_2CO_3 复掺激发矿渣/水泥体系凝结时间和抗压强度出现“不增却减”的现象, 深入讨论了掺 NaOH/ Na_2CO_3 复合激发剂的作用机理。

关键词:碱激发; 复合激发剂; 矿渣/粉煤灰; 凝结时间; 抗压强度

中图分类号: TU526

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.11.010

Variation of Setting Time and Early Age Compressive Strength of Alkali Activated System

ZHENG Hongchen, LIU Lin*

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Using NaOH, waterglass and a mixture of NaOH and Na_2CO_3 as activators, changes of setting time and 7 d compressive strength for four kinds of binding systems including alkali activated slag, fly ash, slag/fly ash and slag/cement were studied systematically, and the fitting formulas for the changes in setting time and the prediction of early age compressive strength were obtained. The results show that under the condition of single NaOH or waterglass activating slag, adding a small amount of fly ash or cement has no significant effect on the setting time, but will reduce the compressive strength at early age. NaOH/ Na_2CO_3 compound activator can effectively prolong the setting time and improve the compressive strength to a certain extent. In addition, the setting time and compressive strength of slag/cement system activated by NaOH do not increase but decrease due to the addition of Na_2CO_3 . The mechanism of the effect of NaOH/ Na_2CO_3 compound activator is discussed.

Key words: alkali activated; compound activator; slag/fly ash; setting time; compressive strength

碱激发胶凝材料绿色环保, 在替代传统水泥材料方面将起到非常重要的作用。然而, 碱激发胶凝材料面临的问题是: 因胶凝材料体系不同而导致其凝结时间差异很大, 没有统一的规律, 阻碍了其大规模推广及应用。Zivica^[1]和 Fernandez-Jimenez 等^[2]研究碱激发矿渣体系发现, 水玻璃激发时体系在 30 min 内便能完

成初凝, 而碳酸钠 Na_2CO_3 激发时体系初凝时间在 170 min 到 3 d 不等; Lee 等^[3]发现对于水玻璃激发矿渣/粉煤灰体系, 掺入粉煤灰在延缓凝结时间的同时也会降低体系抗压强度; 王新^[4]和李宁^[5]通过 NaOH 和水玻璃分别与 Na_2CO_3 复合的方式来激发矿渣体系, 得出 Na_2CO_3 的掺入能明显延长凝结时间。目前研

收稿日期: 2023-03-16; 修订日期: 2023-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52322805, 51978241)

第一作者: 郑蕻陈 (2000—), 男, 山东枣庄人, 河海大学硕士生。E-mail: 2802872945@qq.com

通讯作者: 刘琳 (1983—), 女, 河北衡水人, 河海大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: liulin@hhu.edu.cn

究多采用 Na_2CO_3 和粉煤灰对碱激发矿渣体系进行调凝,但是碱激发胶凝材料因有多种组合而种类多样,呈现出各自的规律.因此,系统研究涵盖各种碱-胶凝材料体系的凝结时间和抗压强度变化规律,对于推广工作性能合适的低碳混凝土具有重大意义.

本文以 NaOH 和水玻璃作为激发剂,矿渣、粉煤灰及水泥作为胶凝材料, Na_2CO_3 作为缓凝剂,研究了各种碱激发材料体系的凝结时间和抗压强度变化规律,得出凝结时间与掺量变化公式和早期抗压强度预测公式,可为碱激发混凝土的材料设计与调控提供依据.

1 试验

1.1 原材料

矿渣(S):比表面积 $450\text{ m}^2/\text{kg}$,密度 $2.84\text{ g}/\text{cm}^3$,质量系数1.61,碱性系数0.93,28 d活性系数0.95.粉煤灰(FA):F类一级粉煤灰,比表面积 $430\text{ m}^2/\text{kg}$,密度 $2.42\text{ g}/\text{cm}^3$.水泥(C):P·II 52.5水泥,比表面积 $378\text{ m}^2/\text{kg}$.各胶凝材料化学组成¹⁾见表1.

表1 各胶凝材料化学组成

Table 1 Chemical compositions of cementitious materials

Material	w/%						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Others
Slag	34.11	15.32	0.73	37.25	8.49	0.37	3.73
Fly ash	55.71	32.79	4.43	2.65	0.24	1.54	2.64
Cement	20.11	4.25	3.23	64.85	0.88	0.67	6.01

碱性激发剂:水玻璃(WG),模数为1.0;分析纯 NaOH (NH),纯度为99%;分析纯 Na_2CO_3 (NC).

1.2 试验设计

本试验均控制水胶比为0.35,碱掺量为6%,室温为 $20\text{ }^\circ\text{C}$.制备 NaOH 和水玻璃激发的矿渣及粉煤灰单一胶凝材料体系.同时,制备矿渣/粉煤灰与矿渣/水泥复合胶凝材料体系,其中粉煤灰或水泥按照总胶凝材料质量的20%、40%、60%、80%替代矿渣,分别用 NaOH 和水玻璃激发.

另外,以30%的 Na_2CO_3 替代 NaOH ,制备成 $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{CO}_3$ 复合激发剂,掺入100%矿渣、80%矿渣+20%粉煤灰和80%矿渣+20%水泥3个胶凝体系. Na_2CO_3 在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时溶解度为22 g,在本文水胶比0.35条件下,其提供的最大碱掺量为3.7%(<6.0%),故不单独作为激发剂使用.(注:碱掺量为总 Na_2O 与总胶凝材料质量之比; Na_2CO_3 掺量为其提供的 Na_2O 和总 Na_2O 质量之比)

试件编号方式为“激发剂-胶凝材料”,如NH-S/

FA代表 NaOH 激发的矿渣/粉煤灰体系.

1.3 试验方法

凝结时间测定采用维卡仪,按照GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》进行.抗压强度测定用RFP-03型智能测力仪,对边长为40 mm的立方体净浆试件进行测试,加荷速度为 $0.6\text{ MPa}/\text{s}$.

2 结果与讨论

2.1 单一胶凝材料体系

表2给出了单一激发矿渣、粉煤灰与水泥胶凝体系的初、终凝时间与早期抗压强度.由表2可见:碱激发矿渣凝结较快,在30 min左右便能完成初凝.这是因为矿渣中的Ca—O键能较弱,会释放出 Ca^{2+} ,同时OH⁻易使矿渣玻璃体中的Si—O、Al—O、Al—O—Si键发生断裂,这些离子与 Ca^{2+} 重聚,迅速形成对强度有贡献的水化硅酸钙(C-S-H)和水化硅铝酸钙(C-A-S-H)凝胶,因此在较短时间内完成凝结^[6];而碱激发粉煤灰在常温下凝结较慢,这是因为粉煤灰中CaO/ SiO_2 质量比较小,玻璃体中 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 的聚合度较高,常温下受碱激发时键断裂较难,所以凝结时间较长^[7].

表2 单一胶凝材料凝结时间与早期抗压强度

Table 2 Setting time and early age compressive strength of single binding materials

Material	Activator	Setting time/min		Compressive strength/MPa	
		Initial	Final	3 d	7 d
Slag	Waterglass	25	38	52.4	62.9
Slag	NaOH	33	41	35.6	47.9
Fly ash	Waterglass	744	902	0.6	0.7
Fly ash	NaOH	2 395	2 508	—	0.5
Cement		245	273	56.1	67.4

2.2 复合胶凝材料体系

2.2.1 碱激发矿渣/粉煤灰体系

碱激发矿渣/粉煤灰净浆性能如图1所示.由图1(a)可见:体系凝结时间随着粉煤灰掺量 w_{FA} 的增加而增加;当粉煤灰掺量小于60%时,粉煤灰的掺入对延缓体系凝结固化的影响不大,凝结时间受矿渣短时间内发生反应所生成C-A-S-H凝胶的影响;而当粉煤灰掺量大于60%时,体系凝结时间变化较大,大掺量的粉煤灰导致矿渣受激发早期形成的凝胶量少而无法较好地团聚.

1)文中涉及的组成、掺量和水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

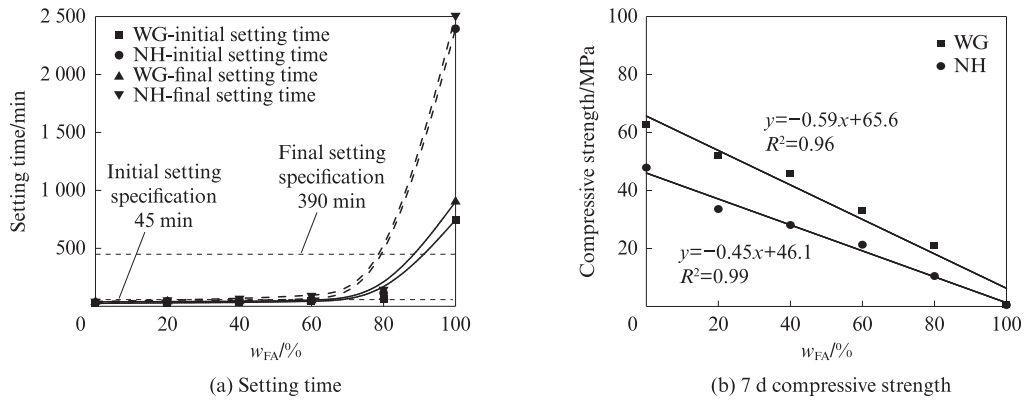


图1 碱激发矿渣/粉煤灰净浆凝结时间与早期强度

Fig. 1 Setting time and early age compressive strength of alkali-activated slag/fly ash paste

以粉煤灰掺量 $w_{FA} = 60\%$ 为分隔点, 拟合得到碱激发矿渣/粉煤灰体系凝结时间与粉煤灰掺量的关系曲线, 见式(1)~(4).

$$T_{NH-S/FA}^0 = \begin{cases} 0.49w_{FA} + 32.8, & w_{FA} \leq 60 \\ 0.174\exp(0.09w_{FA}), & w_{FA} > 60 \end{cases} \quad (1)$$

$$T_{WG-S/FA}^0 = \begin{cases} 0.0031w_{FA}^2 + 0.0875w_{FA} + 25.25, & w_{FA} \leq 60 \\ 0.391\exp(0.0719w_{FA}), & w_{FA} > 60 \end{cases} \quad (2)$$

$$T_{NH-S/FA}^1 = \begin{cases} 0.66w_{FA} + 41.1, & w_{FA} \leq 60 \\ 0.312\exp(0.086w_{FA}), & w_{FA} > 60 \end{cases} \quad (3)$$

$$T_{WG-S/FA}^1 = \begin{cases} 0.0037w_{FA}^2 - 0.035w_{FA} + 38.3, & w_{FA} \leq 60 \\ 0.469\exp(0.0723w_{FA}), & w_{FA} > 60 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $T_{NH-S/FA}^0$ 、 $T_{NH-S/FA}^1$ 分别为 NaOH 激发矿渣/粉煤灰体系的初凝、终凝时间, min; $T_{WG-S/FA}^0$ 、 $T_{WG-S/FA}^1$ 为水玻璃激发矿渣/粉煤灰体系的初凝、终凝时间, min.

由图1(b)可见, 体系抗压强度随着粉煤灰掺量的增加而降低, 这与 Fang 等^[8]和梁健俊^[9]的研究结果相似. 这是因为在常温非蒸养条件下粉煤灰相对稳定, 反应程度较低, 对抗压强度贡献较少. 早期抗压强度和粉煤灰掺量之间存在较好的线性关系, 见式(5)、(6).

$$f_{NH-S/FA}^0 = -0.45w_{FA} + 46.1 \quad (5)$$

$$f_{WG-S/FA}^0 = -0.59w_{FA} + 65.6 \quad (6)$$

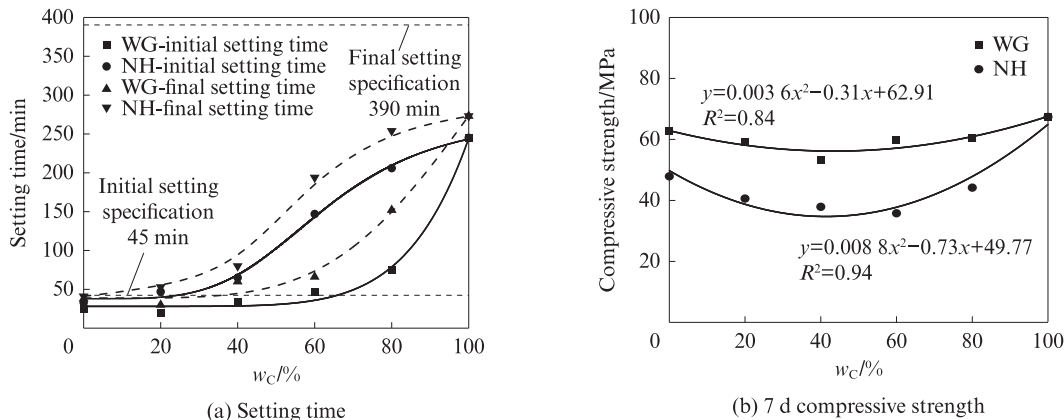


图2 碱激发矿渣/水泥净浆凝结时间与早期强度

Fig. 2 Setting time and early age compressive strength of alkali activated slag/cement paste

式中: $f_{NH-S/FA}^0$ 为 NaOH 激发矿渣/粉煤灰体系 7 d 抗压强度, MPa; $f_{WG-S/FA}^0$ 为水玻璃激发矿渣/粉煤灰体系 7 d 抗压强度, MPa.

根据式(1)、(3)和(5), 对于 NaOH 激发矿渣/粉煤灰复合体系, 掺入 25%~86% 的粉煤灰可使体系的凝结时间满足规范要求, 当 $w_{FA} = 25\%$ 时, 体系抗压强度由未掺时的 47.9 MPa 降低至 34.8 MPa, 降低了 27%; 根据式(2)、(4)和(6), 对于水玻璃激发矿渣/粉煤灰复合体系, 则需掺入 75%~92% 的粉煤灰, 当 $w_{FA} = 75\%$ 时体系抗压强度预计会降低至 21.4 MPa, 比未掺时降低了 66%. 可见, 粉煤灰的掺入并未起到明显的缓凝作用, 反而会使体系抗压强度大幅下降, 因此仅通过掺入粉煤灰的方式改善不了碱激发材料速凝的问题.

2.2.2 碱激发矿渣/水泥体系

由水泥与矿渣混合制备的碱激发矿渣/水泥体系性能如图2所示. 由图2(a)可见: 体系的凝结时间大致随着水泥掺量 w_C 的增加而延长; 在 NaOH 激发工况下, 体系凝结时间呈现稳步增长的趋势; 但在水玻璃激发工况下, 体系凝结时间变化不大.

拟合得到碱激发矿渣/水泥体系凝结时间与水

泥掺量的关系曲线,见式(7)~(10).

$$T_{\text{NH-S/C}}^0 = 0.0126w_c^2 + 1.0237w_c + 27.32 \quad (7)$$

$$T_{\text{WG-S/C}}^0 = 0.007w_c^3 - 0.069w_c^2 + 1.7024w_c + 19.57 \quad (8)$$

$$T_{\text{NH-S/C}}^1 = 0.0069w_c^2 + 1.9382w_c + 29.21 \quad (9)$$

$$T_{\text{WG-S/C}}^1 = 0.0003w_c^3 - 0.0102w_c^2 + 0.1251w_c + 35.89 \quad (10)$$

式中: $T_{\text{NH-S/C}}^0$ 、 $T_{\text{NH-S/C}}^1$ 分别为NaOH激发矿渣/水泥体系的初凝、终凝时间,min; $T_{\text{WG-S/C}}^0$ 、 $T_{\text{WG-S/C}}^1$ 为水玻璃激发矿渣/水泥体系的初凝、终凝时间,min.

由图2(b)可见,随着水泥掺量的增加,碱激发矿渣/水泥净浆7d抗压强度呈现先减小后增加的趋势,这与Bilim等^[10]和Acevedo-Martinez等^[11]的研究结果类似,在水胶比0.50条件下,水泥掺量为20%~40%时,复合体系的7d抗压强度均低于纯矿渣和纯硅酸盐水泥体系.原因在于:碱性环境下矿渣和硅酸盐水泥水化相互影响,生成大量氢氧化钙Ca(OH)₂和Na取代的C-S-H(N-C-S-H),密度和强度低于硅酸盐水泥的水化产物.早期抗压强度和水泥掺量之间存在曲线关系,见式(11)、(12).

$$f_{\text{NH-S/C}}^1 = 0.0088w_c^2 - 0.73w_c + 49.77 \quad (11)$$

$$f_{\text{WG-S/C}}^1 = 0.0036w_c^2 - 0.31w_c + 62.91 \quad (12)$$

式中: $f_{\text{NH-S/C}}^1$ 为NaOH激发矿渣/水泥体系7d抗压强度,MPa; $f_{\text{WG-S/C}}^1$ 为水玻璃激发矿渣/水泥体系7d抗压强度,MPa.

矿渣/水泥复合体系终凝时间均满足规范标准.若只考虑初凝时间要求,根据式(7)、(11),当采用NaOH激发时,最少需掺入21%的水泥.此时,体系7d抗压强度为38.7MPa,与碱激发纯矿渣体系相比降低了19%;根据式(8)、(12),当采用水玻璃激发时,则需掺入71%的水泥,虽然体系抗压强度没有明显降低,但如此大的水泥掺量与“低碳减排”理念背道而驰.

综上,碱激发矿渣/水泥体系中水泥的掺入能在较小程度上改善NaOH工况下的速凝问题,而对水玻璃工况下无明显改善;水泥的掺入对早期抗压强度有劣化作用,复合胶凝材料体系强度低于单一激发矿渣和单一水泥净浆的强度.

2.3 掺Na₂CO₃复合激发剂对碱激发胶凝材料性能的影响

除了NaOH激发矿渣/水泥体系之外,Na₂CO₃对碱激发矿渣、碱激发矿渣/粉煤灰和碱激发矿渣/水泥这3种胶凝体系都起到缓凝的作用;并且Na₂CO₃的掺入使得各体系早期抗压强度呈现不同程度的增加,如表3所示.这与Bernal等^[12]的研究结果一致,一方面,Na₂CO₃的加入降低了矿渣中Ca²⁺的溶出速率;

另一方面,Na₂CO₃提供的CO₃²⁻会优先结合从矿渣中溶解出的Ca²⁺,形成CaCO₃.矿渣中的铝硅酸盐组分与激发剂中的Na⁺反应生成Na₁₂Al₁₂Si₁₂O₄₈·18H₂O(沸石),但这些物相没有提供发展早期高机械强度所必需的高度内聚结构,只有待溶液中的CO₃²⁻被大量消耗时,才开始生成对强度有贡献的C-A-S-H.Na₂CO₃的掺入使得体系孔隙率下降,对水化产物的结构有一定的优化作用,因此增加了早期抗压强度.

另外,当掺入Na₂CO₃后,NaOH激发矿渣/水泥的凝结时间和抗压强度都出现“不增却减”的现象.具体原因将在下文进一步讨论.

表3 Na₂CO₃对碱激发胶凝材料凝结时间与早期抗压强度的影响
Table 3 Effect of sodium carbonate on setting time and early age compressive strength of alkali activated materials

Material	Activator	Setting time/min		Compressive strength/MPa	
		Initial	Final	3 d	7 d
100%S	WG	25	38	52.4	62.9
	WG+NC	32	64	56.7	71.1
	NH	33	41	35.6	47.9
	NH+NC	58	76	38.7	53.6
80%S+20%FA	WG	29	39	45.3	51.7
	WG+NC	56	108	47.5	54.6
	NH	34	43	29.1	33.6
	NH+NC	183	236	32.5	36.1
80%S+20%C	WG	18	35	51.1	59.2
	WG+NC	47	103	54.6	68.7
	NH	55	80	33.5	44.6
	NH+NC	46	65	29.1	36.1

3 掺Na₂CO₃复合激发剂的作用机理

NaOH激发矿渣24h后,体系产物有C-A-S-H、C-S-H和水滑石相^[5,13-14];NaOH激发粉煤灰则生成水化硅铝酸钠(N-A-S-H)凝胶^[14];当Na₂CO₃作为激发剂激发矿渣时,除C-A-S-H、C-S-H外,还有CaCO₃的生成^[12-13,15];NaOH/Na₂CO₃复合碱溶液激发粉煤灰时,除N-A-S-H凝胶外,还有CaCO₃和少量NaHCO₃生成^[16].硅酸盐水泥水化产物为C-S-H、Ca(OH)₂以及水化硫铝酸钙(Aft)^[17-20];当孔溶液中含有Na₂CO₃时,则有CaCO₃和水化铝酸三钙(C₃AH₆)等新的产物出现^[17-18,20].

Na₂CO₃复合激发剂在矿渣/粉煤灰胶凝体系中的作用机理如图3(a)、(b)所示.在常温非蒸养条件下,粉煤灰的活性较低,反应主要受矿渣的影响.由图3(a)、(b)可见:在单一激发剂NaOH中OH⁻的作用下,矿渣溶解释放出Ca²⁺,与玻璃体中释放出的

$[\text{SiO}_4]^{4-}$ 、 $[\text{Al}(\text{OH})_3]^-$ 等离子重聚,迅速形成具有强度结构的C-A-S-H凝胶;在 Na_2CO_3 和 NaOH 复合激发的情况下, OH^- 含量减少,溶液的pH值下降,降低了矿渣的溶解速率^[12].此外,溶液中大量的 CO_3^{2-} 与从矿渣中溶解出的 Ca^{2+} 结合,形成 CaCO_3 沉淀物,在早期水化时阻碍了C-A-S-H的生成,但 CaCO_3 的存在使后期微结构更加密实.因此,对比单一 NaOH 激发的情况,复合激发时体系凝结时间延长,7 d抗压强度增大.

针对掺入 Na_2CO_3 复合激发剂后 NaOH 激发矿渣/水泥胶凝体系凝结时间与抗压强度“不增却减”的现象(表3),其复合激发剂作用机理如图3(c)、(d)所示.由图3(c)、(d)可见:水化时,水泥中的石膏会

与铝酸三钙(C_3A)反应,生成 AFt ,沉淀在水泥颗粒表面或周围,减缓水化;而复合激发剂中的 Na_2CO_3 会与水泥中的石膏反应,形成 CaCO_3 沉淀物,石膏的消耗使其在水泥颗粒表面形成的保护膜作用失去,导致水泥中的 C_3A 迅速水化生成 C_3AH_6 . C_3A 水化放热的同时又促进了 C_3S 的水化和 NaOH 激发矿渣的反应.在反应前期迅速生成的 CaCO_3 、 C_3AH_6 晶体和一定量的C-S-H、C-A-S-H凝胶等搭接成固相骨架,体系从而表现出凝结硬化加速^[17].但这种固相骨架的力学性能不如由大量C-S-H和C-A-S-H搭接而成的骨架,导致体系7 d抗压强度降低.这解释了 Na_2CO_3 与 NaOH 复掺激发矿渣/水泥胶凝体系凝结时间加快、抗压强度降低的现象.

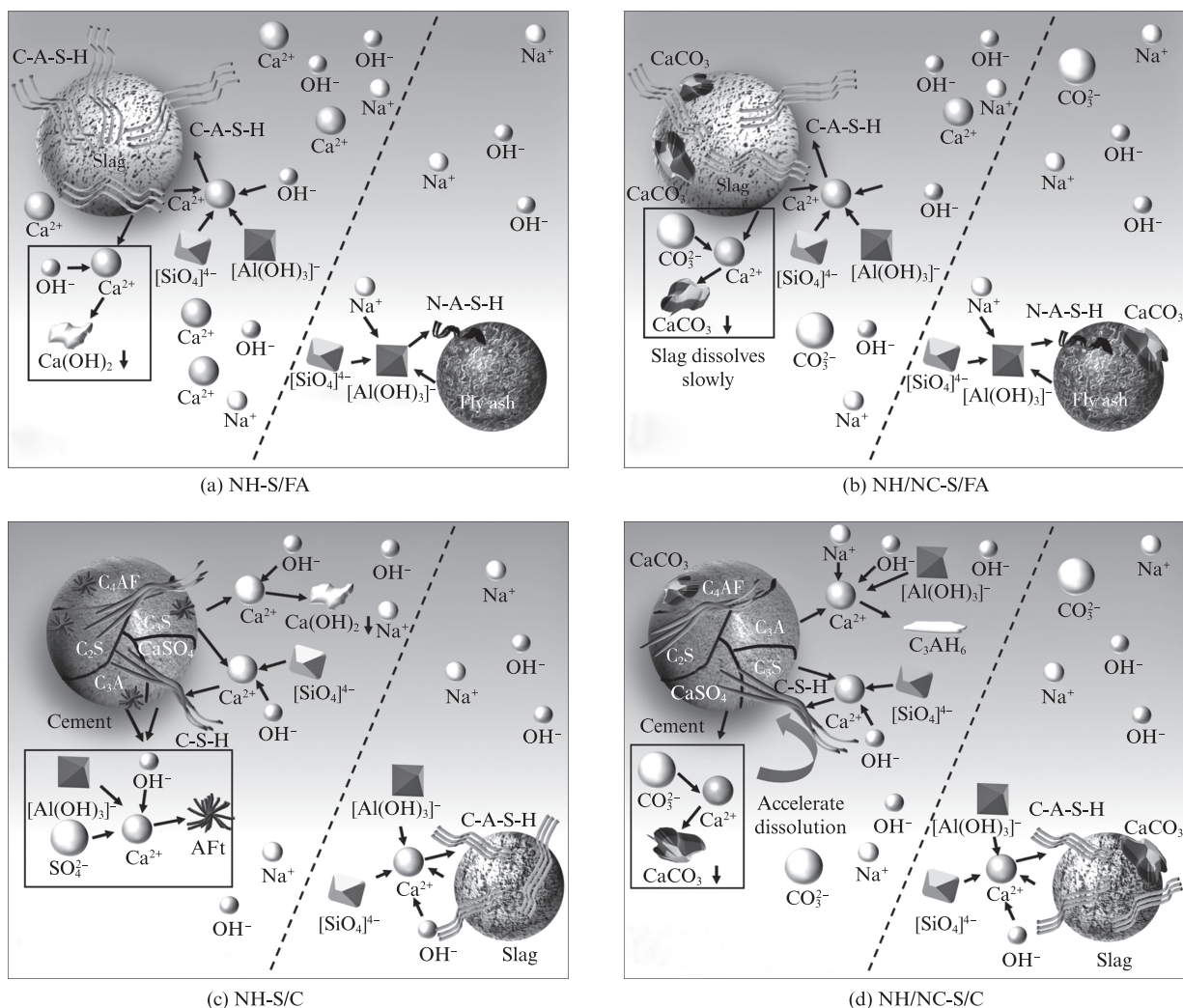


图3 Na_2CO_3 复合激发剂的作用机理

Fig. 3 Action mechanism of compound activator with Na_2CO_3

4 结论

(1)碱激发矿渣胶凝材料体系凝结时间最快,碱激发粉煤灰胶凝材料体系凝结时间最慢.对于矿渣/

粉煤灰复合胶凝材料体系,凝结时间随着粉煤灰掺量的增大而增加,但当粉煤灰掺量小于60%时,凝结时间主要受矿渣反应的影响;早期抗压强度变化与粉煤灰掺量呈线性关系,随着粉煤灰掺量的增加而

下降,在水玻璃激发工况下的下降速率更快。

(2)碱激发矿渣/水泥体系中水泥掺量的增加在较小程度上延长了凝结时间,在水玻璃激发工况下体系凝结时间仍然快于规范要求。由于碱性环境下矿渣反应和水泥水化的相互影响,碱激发矿渣/水泥体系抗压强度低于碱激发纯矿渣或单一水泥水化时的抗压强度。

(3)相比于单一激发剂,NaOH与 Na_2CO_3 复掺激发80%矿渣+20%粉煤灰和80%矿渣+20%水泥复合胶凝材料时,凝结时间延长,抗压强度增大。

参考文献:

- [1] ZIVICA V. Effects of type and dosage of alkaline activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(7):1463-1469.
- [2] FERNANDEZ-JIMENEZ A, PUERTAS F. Effect of activator mix on the hydration and strength behaviour of alkali-activated slag cements[J]. Advances in Cement Research, 2003, 15(3): 129-136
- [3] LEE N K, LEE H K. Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 1201-1209.
- [4] 王新. 碳酸钠对碱矿渣水泥性能的影响研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
WANG Xin. Investigation of effect of sodium carbonate on properties of alkali-activated slag cement [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [5] 李宁. 碱激发矿渣水泥混凝土的原料活性评价与组成设计[D]. 长沙:湖南大学, 2020.
LI Ning. Reactivity evaluation of raw materials and composition design for alkali-activated slag cements and concretes [D]. Changsha: Hunan University, 2020. (in Chinese)
- [6] DURAN ATIS C, BILIM C, CELIK O, et al. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23 (1):548-555.
- [7] 高丽敏. 碱激发粉煤灰胶凝材料性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007.
GAO Limin. Performance research on alkali-activated fly ash coagulation materials [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [8] FANG G H, HO W K, TU W L, et al. Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature [J]. Construction and Building Materials, 2018, 172:476-487.
- [9] 梁健俊. 水玻璃模数与矿渣掺量对碱激发粉煤灰/矿渣复合体系的影响[D]. 广州:广州大学, 2017.
LIANG Jianjun. Effect of the activator modulus and slag content on alkali activated fly ash/slag blended system[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017. (in Chinese)
- [10] BILIM C, ATIS C D. Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag [J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1):708-712.
- [11] ACEVEDO-MARTINEZ E, GOMEZ-ZAMORANO L Y, ESCALANTE-GARCIA J I. Portland cement-blast furnace slag mortars activated using waterglass:-Part 1: Effect of slag replacement and alkali concentration [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37:462-469.
- [12] BERNAL S A, PROVIS J L, MYERS R J, et al. Role of carbonates in the chemical evolution of sodium carbonate-activated slag binders[J]. Materials and Structures, 2015, 48(3):517-529.
- [13] JIAO Z Z, WANG Y, ZHENG W Z, et al. Effect of dosage of sodium carbonate on the strength and drying shrinkage of sodium hydroxide based alkali-activated slag paste[J]. Construction and Building Materials, 2018, 179:11-24.
- [14] JIANG T, JIN Y. Phase analysis of alkali-activated slag hybridized with low-calcium and high-calcium fly ash [J]. Sustainability, 2022, 14(7):3767.
- [15] YUAN B, YU Q L, BROUWERS H J H. Evaluation of slag characteristics on the reaction kinetics and mechanical properties of Na_2CO_3 activated slag [J]. Construction and Building Materials, 2017, 131:334-346.
- [16] FERNANDEZ-JIMENEZ A, PALOMO A. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(10): 1984-1992.
- [17] 李文达. 调凝剂对普通硅酸盐水泥水化及交流阻抗行为的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
LI Wenda. Influence of adjusting admixture to the hydration and AC impedance behavior of Portland cement[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [18] WANG Y L, HE F X, WANG J J, et al. Comparison of effects of sodium bicarbonate and sodium carbonate on the hydration and properties of Portland cement paste[J]. Materials, 2019, 12(7): 1033.
- [19] 黄天勇. 微量化学外加剂对硅酸盐水泥强度的影响及作用机理[D]. 北京:中国矿业大学, 2014.
HUANG Tianyong. The influence and mechanism of trace chemical admixtures on strength of Portland cement[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese)
- [20] JANOTKA I, MOJUMDAR S C. Degree of hydration in cement paste and C_3A -sodium carbonate-water systems[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2007, 90(3):645-652.