

天然-人工混合骨料砂浆棒的碱-硅酸反应研究*

Research on Alkali-Silica Reaction of Limestone-siliceous River Sand mixed Aggregates

祁义卿, 钱文勋, 白银, 张丰, 葛龙甄

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 为了研究混凝土中粗细骨料搭配比例对碱活性粗骨料碱-硅酸反应 (ASR) 的影响, 根据工程中混凝土常见的粗细骨料比例设计了四种混合骨料比例, 使用与粗骨料同源的细骨料替代粗骨料, 采用砂浆棒快速法 (AMBT) 对四种不同比例混合骨料的碱活性进行评价; 探究单掺 25% 粉煤灰、复掺 25% 粉煤灰和 5% 硅灰对混合骨料碱-硅酸反应的抑制效果, 并对反应产物进行 XRD 分析。结果表明: 四种不同比例的混合骨料仍具有潜在碱活性且不存在明显的“最劣比”现象; 砂浆棒试件中掺加粉煤灰与硅灰后, 碱活性骨料比例较低的混合骨料所受到的 ASR 膨胀抑制效果更明显; 粉煤灰与硅灰主要通过减少水泥水化产物中的 CH, 增加 C-S-H 以及改性 C-S-H 以增强其结合碱离子的能力来减弱 ASR。

关键词: 碱-硅反应; 碱活性抑制; 砂浆棒快速法; 粉煤灰; 硅灰

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 02-0001-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.001

QI Yiqing, QIAN Wenxun, BAI Yin, ZHANG Feng, GE Longzhen

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to study the effect of coarse and fine aggregate matching ratios in concrete on the alkali-active coarse aggregate alkali-silicate reaction (ASR), four kinds of mixed aggregate ratios are designed according to the common coarse and fine aggregate ratios in engineering, and the alkali activity of the four kinds of mixed aggregates with different ratios was evaluated by Accelerated Mortar Bar Test (AMBT). The inhibition effects of 25% fly ash alone, 25% fly ash and 5% silica fume on the ASR of mixed aggregates are investigated, and the reaction products of the specimens are analyzed by XRD. The results show that the four different ratios of mixed aggregates still have alkali reactivity, and there is no obvious "pessimum" phenomenon. The inhibition of ASR expansion is more pronounced for mixed aggregates with lower proportions of alkali-active aggregates after the addition of fly ash and fly ash with silica fume in mortar bar specimens. Fly ash and silica fume inhibit ASR mainly by reducing CH, increasing C-S-H and modifying C-S-H to enhance its ability to bind alkali ions in cement hydration products.

Keywords: alkali-silica reaction; alkali-reactivity inhibition; accelerated mortar bar test; fly ash; silica fume

* 基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFC1511902)。

作者简介: 祁义卿 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 水工新材料及混凝土耐久性的研究。

通信作者: 白银 (1999—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 水工新材料及混凝土耐久性。

收稿日期: 2023-12-10

0 引言

混凝土碱-骨料反应 (AAR)^[1] 是混凝土中的碱与碱活性骨料发生的化学反应, 会导致混凝土产生不可逆的膨胀变形, 因此被形象地称为“混凝土的癌症”。AAR 分为碱-硅酸反应 (ASR) 和碱-碳酸盐反应 (ACR), 混凝土工程中发生的 AAR 大部分

材料科学

是由 ASR 引起^[2-3]。ASR 本质^[4]是骨料中的活性成分（主要为活性 SiO₂）与混凝土孔隙溶液中的碱金属离子（K⁺和 Na⁺）、羟基（OH⁻）反应，进而生成含水碱金属硅酸盐凝胶的过程。

在 AAR 的研究中，“最劣比”现象时有发生，它是指试件膨胀量不随碱活性骨料用量的提升而增加，而是当碱活性骨料与水泥用量、碱含量等材料比例或混合骨料比例达到某一值时，试件膨胀量最大^[5-8]。“最劣比”的存在使得工程对混合骨料使用十分慎重，但是，由于工程受骨料来源影响，不可避免要使用部分碱活性骨料。对于这些骨料，掺入矿物掺合料对其碱活性加以抑制是工程中的常用措施^[9]。粉煤灰与硅灰是常用的矿物掺合料，对 ASR 膨胀也有显著的抑制效果，主要通过以下几种途径实现：二者钙硅比较低，取代水泥后水化产物中 CH 变少，孔溶液 pH 降低，ASR 减弱^[10]；与 CH 发生二次水化产生 C-S-H，细化浆体孔隙，削弱碱离子的迁移能力，抑制膨胀^[11]；掺合料中活性铝离子与 C-S-H 结合，生成了“结合力”强的 C-A-S-H，将碱离子“固化”^[12]。

新疆大石峡水利枢纽工程被称为世界第一高混凝土面板坝^[13]，在前期研究中发现其备选天然骨料具有潜在碱活性，因此，通过对混合骨料的碱活性进行评价，并对抑制措施进行研究，明确混合骨料碱活性情况，探究天然粗骨料是否存在“最劣比”现象，并进行骨料碱活性抑制试验，对其反应产物进行观察，探究其膨胀与膨胀抑制机理，为后续工程提供借鉴。

1 试验

1.1 原材料

水泥采用基准水泥和新疆阿克苏天山多浪水泥有限责任公司生产的 P·MH 42.5 中热硅酸盐水泥，两种水泥物理性能与化学成分见表 1、表 2。性能指

标均满足 GB/T 200—2017《中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥》的相关要求。粉煤灰采用巴州鹏昌工贸有限公司提供的 F 类 I 级粉煤灰，物理性能、化学成分见表 3、表 4，性能指标均满足 GB/T 1596—2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》的相关要求。硅灰产自青海省，其性能指标见表 5，性能指标均满足 GB/T 18736—2017《高强高性能混凝土用矿物外加剂》的相关要求。细骨料使用两种细骨料，一种是人工细骨料，由大石峡水利枢纽工程现场岩石经机械破碎制成，母岩为灰黑色中厚层微晶灰岩夹少量薄层微晶灰岩，平均饱和抗压强度 61 MPa；一种是与现场天然粗骨料同种类天然细骨料。两种细骨料性能指标均满足 SL677 的相关规定，见表 6。拌和用水为自来水。

表 1 水泥的物理性能
Table 1 Physical property of cement

种类	标准稠度 用水量/%	比表面积 / (m ² /kg)	密度 / (g/cm ³)	安定性	凝结时间 /min	
					初凝	终凝
中热水泥	26.4	319	3.16	合格	120	196
基准水泥	26.0	354	3.15	合格	149	216

表 2 水泥的化学成分
Table 2 Chemical composition of cement /%

种类	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	碱含量
中热水泥	22.67	63.44	1.42	5.52	3.50	1.72	0.37
基准水泥	21.96	63.26	2.80	3.53	4.85	2.51	0.57

表 3 粉煤灰的物理性能
Table 3 Physical property of fly ash

密度 / (g/cm ³)	细度 /%	需水量 比/%	烧失量 /%	含水量 /%	活性指数/%	
					28 d	90 d
2.23	8.22	94	1.2	0.14	74	94

表 4 粉煤灰化学成分
Table 4 Chemical composition of fly ash /%

SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	碱含量
56.64	5.96	3.06	4.72	22.40	0.88	2.80

表 5 硅灰性能指标
Table 5 Silica fume performance index

密度 / (g/cm ³)	比表 面积 / (m ² /kg)	需水 量比 /%	烧失量 /%	含水率 /%	SiO ₂ 含量/%	活性指数/%	
						28 d	90 d
2.16	19700	121	2.4	0.1	93.32	118	110

表 6 细骨料性能指标
Table 6 Fine aggregate performance index

种类	饱和面干 吸水率/%	饱和面干表观密度 / (kg/m ³)	表观密度 / (kg/m ³)	细度 模数	含泥 量/%	石粉含量 /%	细颗粒 /%	硫化物及硫酸盐 含量/%	坚固性/%
人工细骨料	1.60	2760	2790	3.1	—	10.7	10.2	0.17	3.6
天然细骨料	0.86	2680	2710	2.6	2.9	—	—	0.11	1.3

1.2 试验方案

1.2.1 混合骨料碱活性鉴定与“最劣比”试验

使用与天然粗骨料同源的细骨料等质量代替天然粗骨料进行 AMBT 测试，其中人工细骨料占混合骨料总量的比例相当于混凝土砂率（混凝土砂率为 30%~40%），以此模拟天然粗骨料与人工细骨料比例对混凝土试件膨胀率的影响。除未加入额外的碱将两种水泥碱含量统一为 0.9%±0.1%外，试件的成型、养护与测量均按照 DL/T 5151—2014《水工混凝土砂石骨料试验规程》进行，配合比见表 7。

表 7 混合骨料碱活性试件配合比
Table 7 The mix proportion of mixed aggregate alkali-reactive specimens

试件编号	人工细骨料/%： 天然细骨料/%	胶凝材料	水/g	砂/g	胶凝材料/g
J1	30：70	基准水泥	188	900	400
Z1	30：70	中热水泥	188	900	400
Z2	33：67	中热水泥	188	900	400
Z3	36：64	中热水泥	188	900	400
Z4	40：60	中热水泥	188	900	400

1.2.2 混合骨料碱活性抑制试验

工程中常使用粉煤灰^[14-15]、硅灰^[16]、矿粉^[17]等矿物掺合料对骨料的碱活性进行抑制。一般情况下，向砂浆棒试件中单独掺加 20%~30%粉煤灰或 10%左右硅灰，可对骨料的碱活性进行有效抑制。基于前期试验结果，采用 AMBT 向水泥中单掺 25%粉煤灰、复掺 25%粉煤灰和 5%硅灰的方式对两种比例的混合骨料进行碱活性抑制试验。混合骨料的级配、组合以及试件的成型等均按照 DL/T 5151—2014《水工混凝土砂石骨料试验规程》进行，配合比见表 8。

表 8 混合骨料碱活性抑制试验配合比
Table 8 The mix proportion of mixed aggregate alkali-reactivity inhibition test

试件编号	人工细骨料/%： 天然细骨料/%	胶凝材料
Z1	30：70	中热水泥
C1	30：70	75%中热水泥+25%粉煤灰
C3	30：70	70%中热水泥+25%粉煤灰+5%硅灰
Z4	40：60	中热水泥
C2	40：60	75%中热水泥+25%粉煤灰
C4	40：60	70%中热水泥+25%粉煤灰+5%硅灰

1.2.3 ASR 产物及其抑制产物物相试验

对 AMBT 测试后 28 d 龄期的试件取样，进行 XRD 测试。使用 AL27MINI X 射线衍射仪对试样进行物相成分测试，测试角度为 2θ=5°~70°，扫描速率为 0.05°/s。

2 试验分析

2.1 混合骨料碱活性鉴定试验

由图 1 砂浆棒试件膨胀率可知，14 d 时 Z1 和 J1 组的砂浆棒膨胀率均为 0.183%，28d 时 Z1 和 J1 组砂浆棒膨胀率分别为 0.318%和 0.348%，两种水泥砂浆棒试件 14 d 膨胀率均介于 0.1%~0.2%之间，28 d膨胀率均大于 0.2%，参照 DL/T 5151—2014《水工混凝土砂石骨料试验规程》中的标准对骨料碱活性判别，判定该混合骨料为具有潜在危害反应的碱活性骨料。对两种水泥的砂浆棒试件膨胀率进行分析，发现两者 14、28 d 膨胀率结果偏差小于 10%，由此可认为两种水泥化学组分的差异对骨料碱活性无明显影响。造成该现象的原因可能是：砂浆棒试件养护在 80℃的碱溶液中，碱骨料反应所需要的碱离子充足，两种砂浆棒试件膨胀率相差不大。

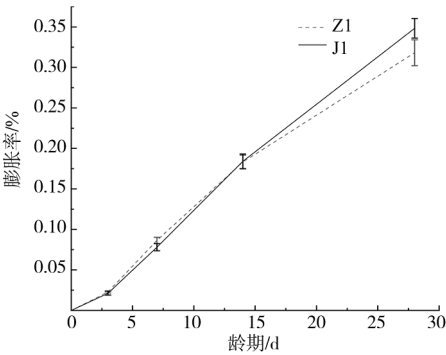


图 1 基准水泥与中热水泥砂浆棒膨胀率
Fig. 1 Plot of bar expansion of reference and medium-hot cement mortars

由图 2 可知，4 组砂浆棒试件 Z1~Z4 的 14 d 膨胀率依次为 0.183%、0.195%、0.164%、0.180%，28 d 膨胀率依次为 0.318%、0.367%、0.305%、0.325%，4 组试件 14 d 膨胀率均介于 0.1%~0.2%之间，结合 28 d 膨胀率均大于 0.2%的情况判断，这 4 种不同比例的混合骨料均为具有潜在危害性 ASR 活性骨料。试件 14、28 d 膨胀率并不随着碱活性骨料比例的增加而增加，14、28 d 膨胀率最大值、最小值与平均值的偏差均小于 10%，而关于“最劣比”的研究中，不同混合比例骨料往往偏差较大^[6,19]，因此判定本试验所研究的混合骨料并不存在明显的“最劣比”现象。

材料科学

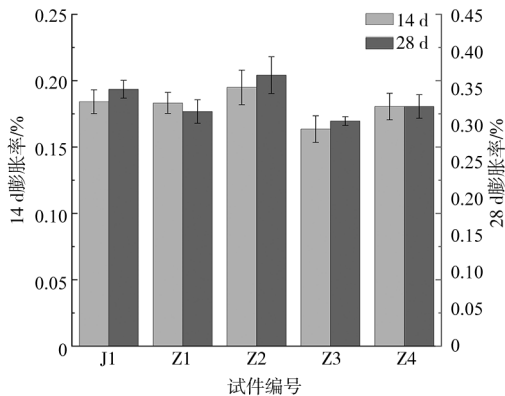


图2 混合细骨料砂浆棒膨胀率

Fig. 2 The expansion rate of mixed fine aggregate mortar bar

2.2 混合骨料 ASR 抑制试验

由前文可知,混合骨料不存在明显的“最劣比”现象,因此选取天然碱活性骨料最多的比例(人工细骨料:天然细骨料为3:7)与最少的比例(人工细骨料:天然细骨料为4:6)进行碱骨料活性抑制试验,矿物掺合料种类与掺量分别为单掺25%粉煤灰与复掺25%粉煤灰、5%硅灰。如图3(a)、图4(a)所示。

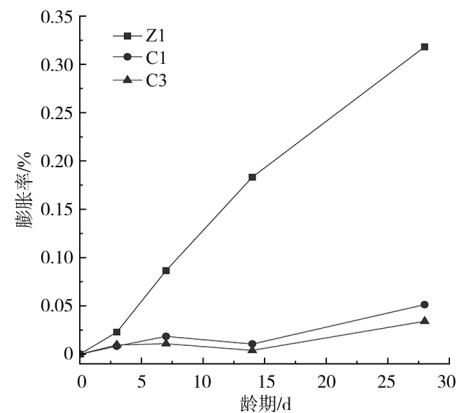
由图3(a)可知,Z1、C1、C3组砂浆棒的14 d膨胀率分别为0.183%、0.011%、0.004%,28 d膨胀率分别为0.318%、0.051%、0.035%,单掺25%粉煤灰时,砂浆棒试件的14、28 d膨胀抑制率分别为94.0%、84.0%,骨料碱活性抑制效果明显,在此基础上再掺入5%硅灰,砂浆棒试件的碱活性抑制效果进一步增强,14、28 d膨胀抑制率分别为97.8%、89.0%。

为了探明混合骨料 ASR 产物及其抑制产物的物相,对经过 AMBT 测试后 28 d 的 Z1、C1、C3 组砂浆棒试件取样并进行 XRD 测试,XRD 测试结果如图3(b)所示。Z1、C1、C3 组砂浆棒试件中主要存在的物相有 SiO_2 、C-S-H、CH、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Na-OH}$ 、 CaCO_3 , 以及一些沸石结构相 ($\text{Ca}_{3.40}\text{Na}_{0.56}\text{Al}_{7.42}\text{O}_{32.00}\text{Si}_{8.58}$)。其中, SiO_2 的衍射峰主要存在于 21.9° 、 26.6° ; C-S-H 的衍射峰主要存在于 29.3° 、 34.1° ; CH 的衍射峰主要存在于 18.0° 、 34.1° 、 47.1° ; $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Na-OH}$ 的衍射峰主要存在于 8.7° 、 42.5° 、 48.5° ; 沸石结构相的衍射峰主要存在于 18.0° 、 27.4° 、 30.9° ; CaO_3 的衍射峰主要存在于 29.3° 、 39.5° 。通过对图3(b)分析可以发现:

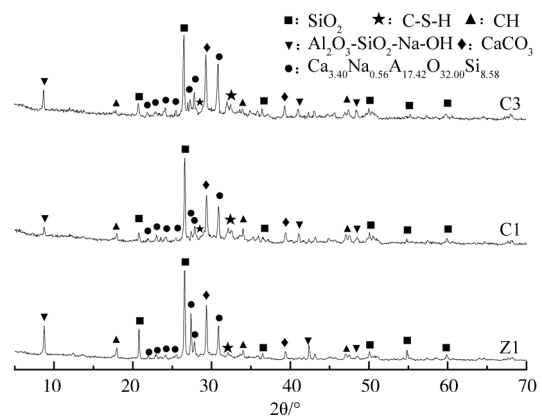
(1) 随着粉煤灰、硅灰的逐步加入,C1、C3 试

件 CH 的衍射峰逐渐变弱,产物物相中 CH 减少,孔隙溶液 pH 降低,骨料中无定形二氧化硅溶解度变小,ASR 减弱;同时,由于粉煤灰与硅灰的加入, SiO_2 含量增加,C-S-H 衍射峰面积增大,水化反应生成的 C-S-H 增加,细化了浆体孔隙,减弱了活性碱离子的渗透。

(2) 砂浆棒试件的物相有大量沸石结构相,这是因为粉煤灰中活性 Al_2O_3 含量较大, Al^{3+} 吸附在碱活性骨料的表面,形成了沸石类结构的屏障,阻止了碱活性骨料中活性 SiO_2 的溶解,减弱了 ASR,这与孙景卫^[20]、杨立荣等^[21]、高鹏等^[22] 的发现类似;同时 Al^{3+} 与 C-S-H 中的 Si^{4+} 发生置换,形成的 C-A-S-H 增强了 C-S-H 结合碱的能力,在图中表现为 C1、C3 砂浆试件沸石结构相 C-N-A-S-H 衍射峰增强。



(a) 膨胀率



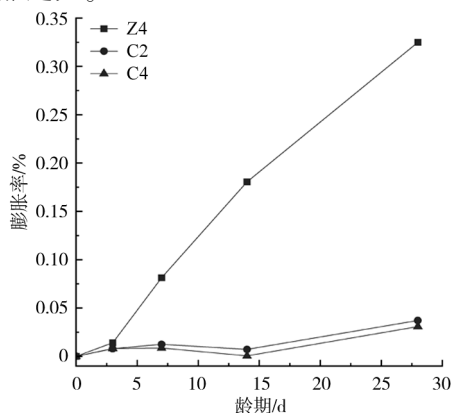
(b) XRD 测试

图3 单掺5%粉煤灰的砂浆棒膨胀率与XRD测试结果
Fig. 3 Test results of XRD and expansion rate of mortar bar with 5% fly ash alone

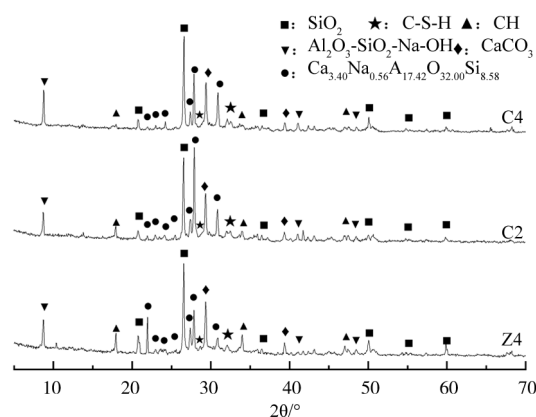
从图 4 (a) 中可以看出, Z4、C2、C4 组砂浆棒的 14 d 膨胀率分别为 0.195%、0.007%、0.001%, 28d 膨胀率分别为 0.325%、0.037%、0.030%, 向两组砂浆棒试件中加入矿物掺合料后, 砂浆棒试件的 28 d 膨胀率均小于 0.1%, 掺入矿物掺合料对碱活性骨料起到了明显的抑制作用。当粉煤灰掺量为 25% 时, 砂浆棒试件的 14、28 d 膨胀抑制率为 96.0%、88.6%, 在此基础上再掺加 5% 硅灰后, 砂浆棒试件的 14、28 d 膨胀抑制率为 99.7%、90.5%, 相比于相同粉煤灰与硅灰掺量的砂浆棒膨胀抑制率更高。

由图 4 (b) XRD 可以发现, 产物主要物相基本与图 3 (b) 物相相同, 砂浆棒试件未掺入矿物掺合料时, CH 相含量较高, C-S-H “馒头状” 衍射峰面积相对于 C2、C4 砂浆棒试件的小, 当向砂浆棒试件中掺入 25% 粉煤灰后, 由于粉煤灰中含有较少的 CaO 和较多的 Al_2O_3 , 稀释了胶凝材料中钙相的含量, 因此水化产物中 CH 相含量减少, 且粉煤灰中的 Al_2O_3 在高温养护环境下与水泥充分反应, 使 C-S-H 部分变为结合碱金属离子能力更强的 C-A-S-H^[11], 再掺入 5% 硅灰, 胶凝材料中的钙相进一步被减少, CH 的衍射峰几乎消失不见, 同时 Ca^{2+} 的缺失使得硅灰中的活性 SiO_2 只能与 Al_2O_3 、溶液中大量存在的 Na^+ 相结合, 生成了相比于 C2 砂浆棒试件更多的 Al_2O_3 - SiO_2 - Na-OH 相。

通过对比两种不同比例混合骨料的抑制效果, 发现人工细骨料: 天然细骨料为 40: 60 的砂浆棒受两种矿物掺合料碱活性抑制作用较强, 原因可能是: 在水泥浆体碱含量较低的环境对于骨料 AAR 反应活性的激发程度相同, 此时活性骨料比例越多, 所产生的膨胀越大。



(a) 膨胀率



(b) XRD 测试

图 4 复掺 25% 粉煤灰、5% 硅灰砂浆棒膨胀率与 XRD 测试结果
Fig. 4 Expansion rate and XRD test results of 25% fly ash and 5% wollastonite mortar

3 结论

(1) 四种比例的混合骨料均为具有潜在危害性的 ASR 活性骨料, 但天然细骨料与人工细骨料在 AMBT 测试中不存在明显“最劣比”现象。

(2) 粉煤灰对于 ASR 反应的抑制效果显著, 额外掺入硅灰之后可进一步抑制 ASR 膨胀。

(3) 粉煤灰与硅灰复掺对于碱活性骨料比例少的砂浆棒试件碱活性抑制效果更明显, 水泥基体中碱度低于某一阈值时, 碱活性骨料的比例越大, 试件膨胀量越大, 矿物掺合料的碱活性抑制作用越弱。

(4) 粉煤灰与硅灰的掺入减少了砂浆棒中水化产物 CH 的含量, 削弱了砂浆棒基体中的碱环境, 同时生成了更多的 C-S-H, 并使 C-S-H 转变为吸附碱离子更强的 C-A-S-H, 进而减弱了 AAR 反应。

参 考 文 献

- [1] 杨华全, 李鹏翔, 陈霞. 水工混凝土碱-骨料反应研究综述 [J]. 长江科学院院报, 2014, 31 (10): 58-62.
- [2] 唐明述, 邓敏. 碱集料反应研究的新进展 [J]. 建筑材料学报, 2003, 6 (1): 1-8.
- [3] 周泽聪. 大坝混凝土碱-骨料反应抑制措施长期安全性研究 [D]. 武汉: 长江科学院, 2021.
- [4] XIAO Q H, STRUBLE, LESLIE J, et al. Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and Portlandite [J]. Cement and

(下转第 16 页)

材料科学

- (9): 140-144, 148.
- [13] 韩庆华, 王鑫, 芦燕, 等. 基于三参数威布尔分布模型的铸钢及对接焊缝腐蚀疲劳寿命评估方法 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42 (2): 213-220+230.
- [14] 张愉, 何和平, 田叶. 基于同伦分析法的威布尔分布极大似然估计 [J]. 数学的实践与认识, 2022, 52 (11): 150-158.
- [15] BARBOSA L, GERKE K M, MUNKHOLM L J, et al. Discrete element modeling of aggregate shape and internal structure effects on Weibull distribution of tensile strength [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 219 (14): 105341-105356.
- [16] SHAN J, YANG Z, KUANG X, et al. Comparison of seven Weibull distribution models for predicting relative hydraulic conductivity [J]. Water Resources Research, 2022, 58 (5): 1-19.
- [17] 陈克凡, 乔宏霞, 王鹏辉, 等. 温度循环退化模型的橡胶混凝土可靠寿命预估 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (2): 42-46.
- [18] 肖来荣, 谭威, 刘黎明, 等. 激光增材制造 GH3536 合金的低周疲劳行为 [J]. 中国激光, 2021, 48 (22): 81-91.
- (上接第 5 页)
- Concrete Research, 2004, 34 (9): 1683-1696.
- [5] STANTON T E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate [J]. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1940, 66 (10): 1781-1811.
- [6] 郝挺宇, 冯乃谦. 快速检测骨料碱活性的研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2000, 1 (4): 11-14.
- [7] WIGUM B J, PEDERSEN L T, GRELLK B. State-of-the art report: key parameters influencing the alkali aggregate reaction [R]. Sintef Building and Infrastructure, 2006.
- [8] KURODA T, INOUE S, YOSHINO A, et al. Effects of particle size, grading and content of reactive aggregate on ASR expansion of mortars subjected to autoclave method [C]// International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Beijing, 2004: 736-743.
- [9] FIGUEIRA R B, SOUSA R, COELHO L, et al. Alkali-Silica Reaction in concrete: mechanisms, mitigation and test methods [J]. Construction and Building Materials, 2019, 222 (20): 903-931.
- [10] THOMAS M. The effect of supplementary cementing materials on Alkali-Silica Reaction: A review [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41 (12): 1224-1231.
- [11] SHAFATIAN S, AKHAVAN A, MARAGHECHI H, et al. How does fly ash mitigate Alkali-Silica Reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567) [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 37 (1): 143-153.
- [12] RAJABIPOUR F, GIANNINI E, DUNANT C, et al. Alkali-Silica Reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 76: 130-146.
- [13] 苗喆. 世界第一高混凝土面板坝—新疆大石峡水利枢纽工程正式开工建设 [J]. 水力发电, 2018, 44 (2): 36.
- [14] 李光伟. 粉煤灰抑制水工混凝土 ASR 长期暴露试验研究 [J]. 水力发电, 2023, 49 (2): 112-117.
- [15] 孙延飞, 李双喜, 陆瑶, 等. 骨料碱活性检验及抑制碱骨料反应的试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (3): 72-74, 84.
- [16] 王阳, 蒋玉川, 高永刚. 硅灰对高性能混凝土长期耐久性能的影响 [J]. 中国建材科技, 2010, 19 (增刊 2): 121-124.
- [17] 周晓青, 易阳, 汪峻峰, 等. 新疆大石峡水利枢纽混凝土碱-硅酸反应抑制研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (2): 448-453.
- [18] 张桂华, 张丰. 卵石和砂岩骨料碱活性分析及混凝土综合性能 [J]. 中国农村水利水电, 2022 (5): 201-208.
- [19] MULTON S, CYR M, SELLIER A, et al. Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 38 (4): 350-359.
- [20] 孙景卫. 铝盐对 ASR 的阻止作用及机理研究 [D]. 唐山: 河北理工大学, 2008.
- [21] 杨立荣, 封孝信, 刘刚, 等. 铝离子对碱-硅酸反应膨胀的阻止作用研究 [J]. 混凝土, 2016 (5): 31-34.
- [22] 高鹏, 余红发, 文静, 等. 引气剂对延缓高海拔强碱环境下碱-硅酸反应的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2019, 47 (5): 625-631.