

高温后碱激发海砂混凝土无尺寸效应断裂参数的预测

王俊豪, 杨树桐, 孙忠科

(中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 海洋环境中服役的结构在受到高温侵蚀作用后产生的损伤是不可估量的。碱激发海砂混凝土抵抗裂缝展开的能力需要被评估后才可以将其应用于海洋环境中。然而混凝土内部通常是不均匀的以及不连续的, 并且这种情况在高温作用后会更加明显。为了探究这个问题, 本文研究了两种不同矿渣粉(GGBFS)/粉煤灰(FA)质量比海水、海砂拌制的碱激发海砂混凝土在加热制度为 10 °C/min、恒温时间为 180 min 的情况下加热到 200 °C、400 °C、600 °C 以及 800 °C 的目标温度后的残余力学性能、微观表现以及基于边界效应模型(BEM)通过标准三点弯梁试验对无尺寸效应断裂参数抗拉强度 f_t 和断裂韧性 K_{IC} 的预测。研究发现: 随着高温温度升高, f_t 和 K_{IC} 逐渐降低并且降低速度越来越大。在 400 °C 以下, 更高 GGBFS/FA 质量比的碱激发海砂混凝土预测得到的断裂参数值比低 GGBFS/FA 质量比的混凝土高; 超过 400 °C 后, 前者强度损失更大并且其残余强度明显低于后者。

关键词: 碱激发海水海砂混凝土; 高温后; 抗压强度; 抗拉强度; 无尺寸效应断裂参数

中图分类号: TU501

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)02-0220-08

Prediction of fracture parameters without size effect of Alkali-activated sea sand concrete exposed to elevated temperature

WANG Junhao, YANG Shutong, SUN Zhongke

(Department of Civil Engineering, College of Engineering in Ocean University of China,
Shandong Qingdao 266100, China)

Abstract: The damage to structures in service in the marine environment after exposure to the erosive effects of high temperature is incalculable. The ability of alkali-stimulated marine sand concrete to resist crack development needs to be assessed before it can be used in a marine environment. However, concrete is often internally heterogeneous as well as discontinuous, and this becomes more pronounced after high temperatures. In order to explore this problem, this paper studied the residual mechanical properties and microscopic performance of alkali-activated sea sand concrete mixed with seawater and sea sand with two different mass ratios of ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) / fly ash (FA) when heated to 200 °C, 400 °C, 600 °C and 800 °C under the heating system of 10 °C/min and constant temperature time of 180 min, and based on Boundary Effect Model (BEM), the tensile strength f_t and fracture toughness K_{IC} of fracture parameters without size effect were predicted through the standard three-point bending beam test. It was found that with the increase of high temperature, the f_t and K_{IC} gradually decreased and the decrease rate was increasing. Below 400 °C, the predicted fracture parameters of alkali-activated sea sand concrete with higher GGBFS/FA mass ratio were higher than those of concrete with lower GGBFS/FA mass ratio. When the temperature exceeded 400 °C, the strength loss of the former was greater and its residual strength was significantly lower than that of the latter.

Key words: Alkali-activated sea sand concrete, exposed to elevated temperature, compressive strength, tensile strength, fracture parameters without size effect

近年来, 海洋强国战略成为国家发展目标之一, 对沿海、近海建设以及岛礁建设愈发重视, 若从内陆运输河砂及珍贵的淡水资源, 不但会加

大工程成本, 还会造成资源的浪费。此外, 硅酸盐水泥作为建筑施工中使用的重要材料, 其生产过程中不仅会产生大量的尘土还会产生大量的温

收稿日期: 2021-04-01

修改稿日期: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(52178259); 山东省重点研发项目(2019GSF111059)

第一作者: 王俊豪(1996—), 男, 硕士, 主要从事碱激发混凝土力学性能研究。E-mail: 3037367818@qq.com

通信作者: 杨树桐(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事混凝土断裂力学研究。E-mail: shutongyang2013@163.com

室气体及有毒有害气体，这会加速温室效应进一步破坏环境，也阻碍了“碳达峰、碳中和”目标的实现。有数据表明，2021 年 1—10 月份全国规模以上水泥生产 19.7 亿 t，同比 2020 年增长 2.1%，其造成的污染和能源浪费不可估量^[1]。同时，在海洋环境下服役的建筑结构一旦遭受高温侵蚀，在这种海洋腐蚀与高温侵蚀的双重作用下，对建筑物的损害是很大的。

一种新型兼具低碳环保以及耐高温侵蚀的建筑材料——碱激发材料应运而生，相比于普通硅酸盐水泥，碱激发材料具有完全不同的水化机理，同时具有高强、高耐久性的特点^[2-3]。目前，国内外对于碱激发矿粉/粉煤灰混凝土高温后的力学性能的研究已在进行，研究表明碱激发矿粉/粉煤灰混凝土暴露在 800 ℃ 环境下同样可以维持其结构稳定性，并且相比于普通硅酸盐水泥混凝土，碱激发混凝土没有高温爆裂现象^[2,4-5]。Li 等^[6]研究了碱激发矿粉海砂混凝土高温后的力学性能，发现碱激发矿粉混凝土高温后残余抗压强度明显高于普通水泥混凝土，并且碱激发混凝土与普通水泥混凝土的浆体高温后都经历了热收缩，而碱激发混凝土浆体收缩更大。

此外，混凝土在经历高温作用后，其表面会出现肉眼可见的裂缝，这就需要对高温后的混凝土进行断裂行为研究。抗拉强度 f_t 和断裂韧性 K_{IC} 是材料的两个重要的断裂参数，能体现混凝土抵抗裂缝的能力。此外， f_t 和 K_{IC} 基于传统方法得到具有一定的随机性，因为 f_t 基本通过轴向拉伸试验或者劈裂抗拉试验得到，得到的 f_t 是基于材

料连续性以及均匀性的假设而且其值为断裂截面的平均值^[7-9]。然而混凝土是一个以骨料为骨架的材料，所以它是一个不均匀的材料，其断裂参数的确定是依赖于试件尺寸的^[7-9]。基于此，Hu 提出了边界效应模型(BEM)^[10]并发现尺寸效应主要是由于断裂过程区而形成的，BEM 不要求严格的试件几何相似条件，BEM 考虑了材料非均匀性和非连续性并且其公式计算得到 f_t 和 K_{IC} 的方程也更加简单。无尺寸效应的断裂参数对于大构件的设计尤为关键。

对于碱激发海砂混凝土高温后的力学性能及断裂参数的预测方面的研究甚少。本文配制了两种类型碱激发海砂混凝土(AASSC)，分别为粉煤灰与矿粉质量含量比 1 : 3 的 Type1AASSC 以及粉煤灰与矿粉质量含量比为 1 : 1 的 Type2AASSC，研究其五种温度后宏观的抗压和抗拉强度、微观形貌以及预测其断裂参数 f_t 和 K_{IC} 。

1 试验方案

1.1 试验材料及配合比

试验使用的矿粉和粉煤灰分别是 S95 级以及 C 类二级灰。粉煤灰中游离氧化钙含量经检测小于 4%，符合规范要求。他们的化学物质含量由仪器帕纳科 Epsilon3 进行 X 射线荧光光谱(XRF)试验测得如表 1。级配良好的海砂作为细骨料，其最大粒径为 5 mm。破碎的花岗岩骨料作为粗骨料，其最大粒径为 10 mm。海砂细骨料和花岗岩粗骨料的基本物理参数分别展示在表 2 和表 3。试验中使用细、粗骨料的粒径分布如图 1 所示。

表 1 矿粉和粉煤灰的主要化学成分

Tab. 1 Main chemical compositions of GGBFS and FA /%

化学物质	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
GGBFS	44.64	7.14	27.85	12.93	1.65	3.84	0.31	0.18	0.40
FA	13.20	1.19	49.07	24.91	1.20	0.54	7.39	0.07	1.41

表 2 海砂的基本参数

Tab. 2 Basic parameters of sea sand

表观密度 /(kg·m ⁻³)	松散堆积密度 /(kg·m ⁻³)	紧密堆积密度 /(kg·m ⁻³)	细度模数
3 047	1 680	1 820	3

表 3 粗骨料的基本参数

Tab. 3 Basic parameters of aggregates

吸水率 /%	空隙率 /%	表观密度 /(kg·m ⁻³)	松散堆积密度 /(kg·m ⁻³)	紧密堆积密度 /(kg·m ⁻³)
5.1	47	2 613	1 298	1 434

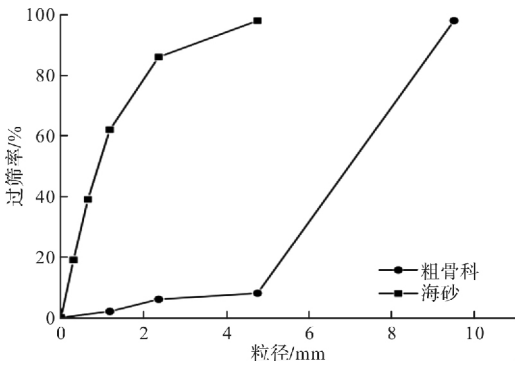


图 1 试验用骨料的粒径分布

Fig. 1 Size distributions of aggregates used in the test

碱激发剂为固体粉末氢氧化钠和液体水玻璃的混合物。水玻璃中含有 8.3% 的 Na_2O 、26.5% 的 SiO_2 和 65.2% 的 H_2O 。氢氧化钠颗粒的纯度为 99%。通过向水玻璃中加入氢氧化钠将碱激发剂中 SiO_2 与 Na_2O 摩尔比控制为 1.3。激发剂占固体粉料(粉煤灰和矿粉)质量的 13%。激发剂混合好后表面封塑料薄膜静置 24 h 后再进行混凝土的配制。海水参考 ASTM D1141-98^[11] 中推荐的人工海水配方配制。本文定义粉煤灰:矿粉质量比 1:3 的为 Type1AASSC, 粉煤灰:矿粉质量比 1:1 的为 Type2AASSC。这两类 AASSC 的具体配合比如表 4 所示。

表 4 AASSC 的配合比 (kg/m^3)

Tab. 4 Mix proportion of AASSC (kg/m^3)

AASSC	矿粉	粉煤灰	细骨料	粗骨料	海水	水玻璃	NaOH
Type 1	375	125	555	677	117	126	21
Type 2	250	250	555	677	117	126	21

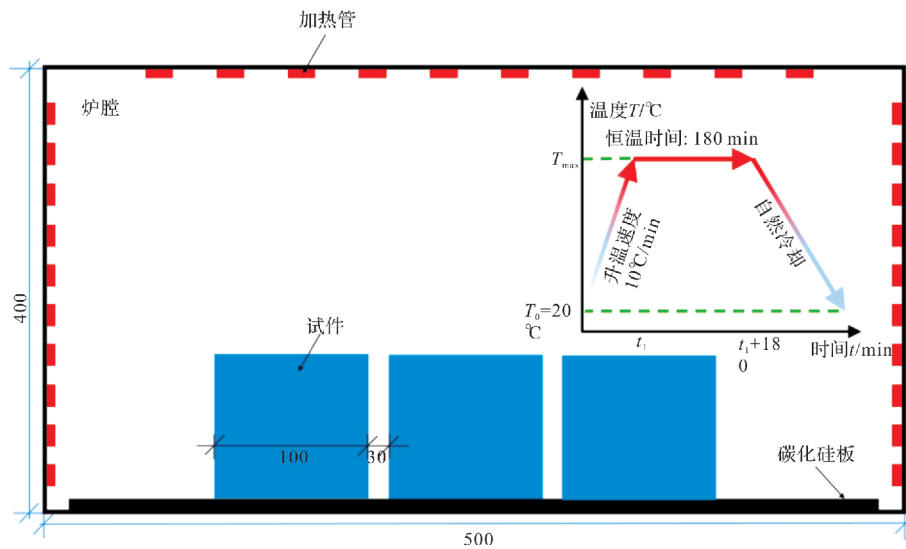


图 2 加热示意图

Fig. 2 Schematic of heating procedure

三点弯断裂试验用的试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 515\text{ mm}$, 在梁底中心预制 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm 的初始裂缝, 相应的缝高比为缝长/梁高 = 0.1~0.5。断裂试验在一台 10 t 的压力试验机上进行, 试验加载速率为 0.2 mm/min, 具体的试验加载图如图 3 所示。使用 7 t 力的传感器实时监测力的数值。跨中以及两端加载支座的位移使用最大量程 50 mm 的位移计测量。预制裂缝处的裂缝口张开位移 (CMOD) 使用最大张开位移 40 mm 的夹式引伸计进行测量。此外, 试件侧面裂缝口对称布置一对应变计来测量裂缝尖端应变, 并通过加载过程中应变片的突然回缩监测裂缝的起裂状态。所有数据均由一静

1.2 试样准备和实验方法

立方体抗压强度 f_{cu} 试验和劈裂抗拉强度 f_{ts} 试验试件尺寸都为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, 参照规范 GB/T50081-2019 进行试验^[12]。常温下, 对两种 AASSC 进行了 7 d 和 28 d 的强度试验; 在高温条件后, 对两种 AASSC 也进行了两种强度试验。高温试验的目标温度分别为 200 °C、400 °C、600 °C 和 800 °C, 常温 20 °C 作为对比组。高温试验在马弗炉中进行, 马弗炉如图 2 所示。升温速度为 10 °C/min, 到达目标温度后恒温时间为 180 min, 等待试件静置至室温后取出进行力学性能试验和三点弯断裂试验, 加载制度也在图 2 中展示。所有的试件在温度 $20 \pm 2\text{ °C}$ 、相对湿度 $95 \pm 2\%$ 的环境下养护至 28 d 进行高温试验。此外, 在高温试验前将试件放入干燥箱 $105 \pm 5\text{ °C}$ 烘干 24 h。

态数据采集仪同步采集。

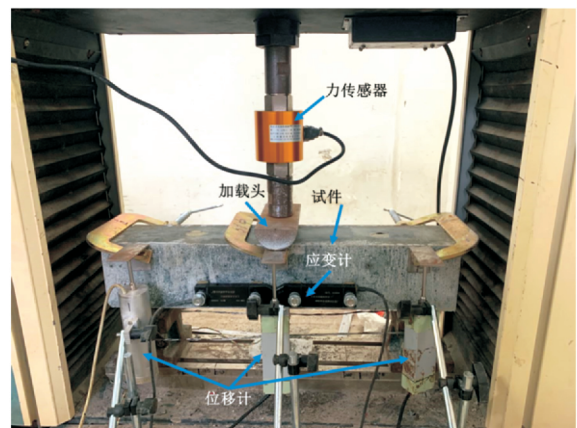


图 3 三点弯梁试验图

Fig. 3 Test setup for three-point-bending beam

2 试验结果分析

2.1 高温后 f_{cu} 和 f_{ts} 的结果分析

图4所示折线图展示的为两种 AASSC 在 7 d 和 28 d 的劈裂抗拉强度变化,柱状图展示的为两种 AASSC 在 7 d 和 28 d 的立方体抗压强度变化.两种 AASSC 养护 7 d 后立方体抗压强度可达 28 d 的 80% 以上,劈裂抗拉强度可达 28 d 的 70% 以上.原因其一为在高 OH^- 的浓度环境中加速了水化过程造成 7 d 强度上涨快^[13-14];其二为海水海砂中丰富的海洋离子如氯离子和硫酸根离子同样可以加速水化过程^[15-16].此外,Type1AASSC 的两种强度在 7 d 和 28 d 下均比 Type2AASSC 的高.其因为本身粉煤灰活性即比矿粉活性低,粉煤灰的作用基本为调节新拌混凝土的流动度,随着粉煤灰的掺量变大,在碱激发胶凝材料体系中同样降低混凝土强度^[14].

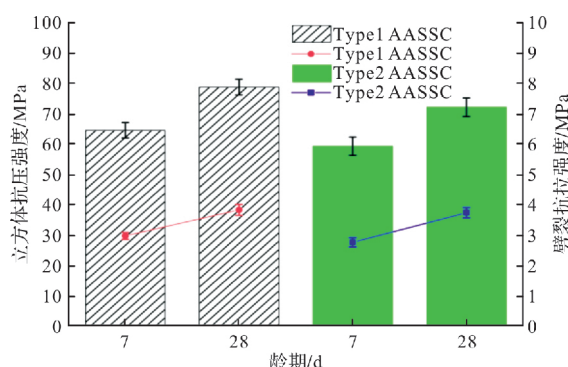


图4 常温下 7 d 和 28 d 的 AASSC 立方体抗压强度和劈裂抗拉强度结果

Fig. 4 Result of 7 d and 28 d cubic compressive strength and splitting tensile strength at 20°C

由图5可知,随着温度的升高,两种 AASSC 的立方体抗压强度在 200 °C 和 400 °C 较常温下稍有提高,Type1AASSC 分别提高 10% 和 3% 左右,Type2AASSC 分别提高 13% 和 9% 左右,此后高温作用导致的强度损失严重.到达 800 °C 时,两种 AASSC 残余强度仅为常温时的 14% 和 44%. 200 °C 强度提高的原因未水化的粉煤灰和矿粉反应生成莫来石以及在此温度下对 AASSC 形成内养护使得强度提高^[17]. 600 °C 后 AASSC 强度急剧下降的原因大量的化学结合水损失造成混凝土内部孔隙变多,以及高温下混凝土会发生膨胀,初始裂缝会变宽边长,膨胀引起的裂缝也会随之增多^[18]. 800 °C 后 AASSC 强度损失 50% 以下,混凝土表面密密麻麻肉眼可见的裂缝,疏松多孔.有意思的是,矿粉含量多的 Type1AASSC 在 20 °C、200 °C 和 400 °C 高温下抗压和抗拉强度比 Type2AASSC

高,原因为更多的矿粉在碱激发作用下产生更多的水化产物如 C-S-H 以及 C-A-S-H,使得结构更为密实,但大掺量矿粉的 Type1AASSC 形成的此类水化产物同样造成了 600 °C 和 800 °C 大幅度强度的损失,原因为 C-S-H 和 C-A-S-H 对高温敏感易分解^[19-21].

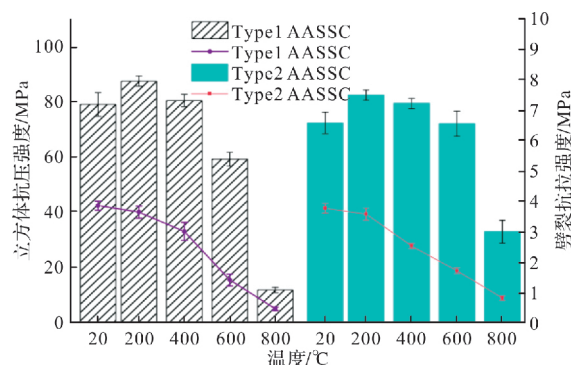


图5 不同高温后两种 AASSC 立方体抗压强度和劈裂抗拉强度的结果

Fig. 5 Results of cubic compressive strength and splitting tensile strength of two types AASSC exposed different elevated temperature

2.2 扫描式电子显微镜 (SEM) 分析

电镜图中红色虚线为碱激发浆体与粗骨料之间的粘结界面.从电镜图中可以看出,常温下两种 AASSC 的碱激发浆体与粗骨料粘结十分紧密,浆体区出现一些收缩裂缝,以及许多未水化的粉煤灰球状颗粒,而且 Type2AASSC 中未水化的粉煤灰球状颗粒更多,微裂缝更多,这也导致其强度低于 Type1AASSC. 200 °C 后,粘结界面依旧比较紧密,未水化的粉煤灰数量明显变少,说明此温度下粉煤灰在碱激发剂作用下继续发生水化反应.这解释了在此温度下 AASSC 抗压强度提高的原因.此外,部分微裂缝在粘结界面开展,并且裂缝宽度逐渐变大.因为自由水的损失,出现了小的孔隙区,这造成了抗拉强度的降低. 400 °C 后,图中所示裂缝数量减少,这是因为高温使得浆体膨胀闭合了部分裂缝^[22].一些大大小小的较大孔隙区出现,在 Type2AASSC 中尤为多见,这造成了浆体松散多孔. 600 °C 后,随着化学结合水的损失,较大孔隙区的数量增多,并且孔隙直径在变大. Type1AASSC 中已经看不到明显的裂缝,而 Type2AASSC 中因为其本身裂缝多,裂缝宽度也逐渐在增大.这些都造成了 AASSC 强度进一步降低. 800 °C 后, Type1AASSC 浆体疏松呈颗粒状,粘结界面十分脆弱. Type2AASSC 则出现了大孔隙区与大裂隙,但相比 Type1AASSC 其粘结界面较为完整.这造成两类 AASSC 在 800 °C 强度的大量损失.

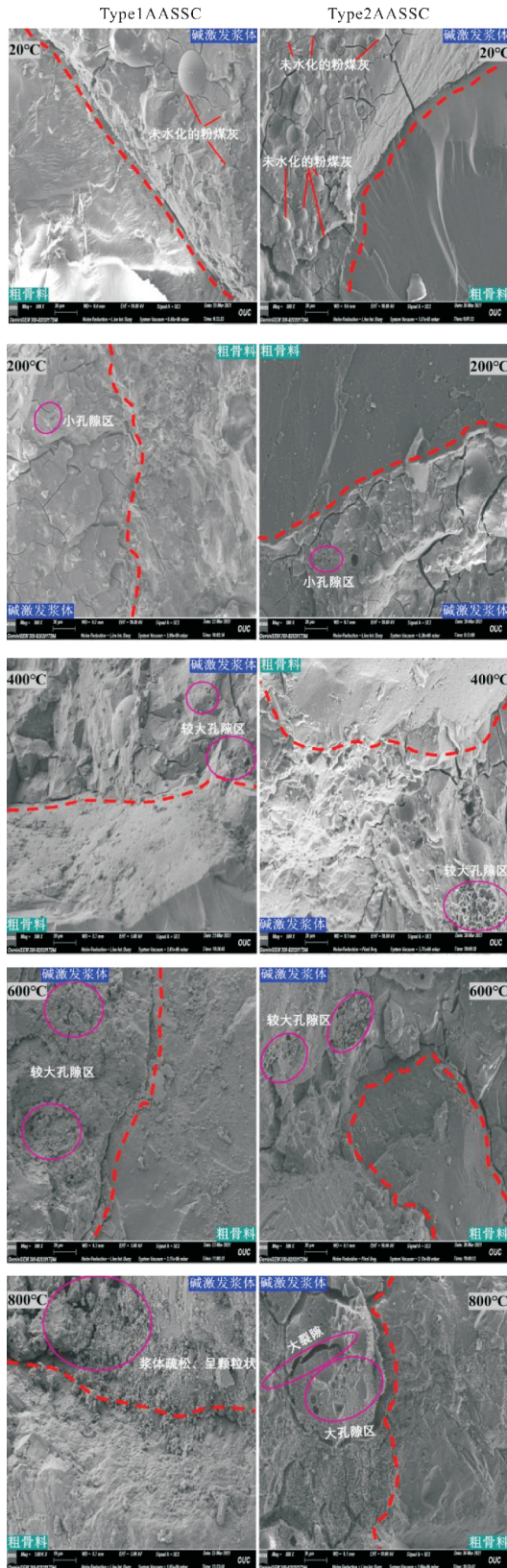


图6 两种 AASSC 不同高温后 SEM 分析

Fig. 6 SEM analysis of two types AASSC exposed different elevated temperature

2.3 基于边界效应的 f_t 与 K_{IC} 的预测

2.3.1 f_t 与 K_{IC} 的闭合解

传统连续介质力学计算得出的 f_t 建立在材料是均匀的, 可是混凝土材料由不同的组分组成, 内部

极其不均匀. 尺寸效应模型被 Bažant 提出, 他提出试件的尺寸对断裂参数的确定有影响^[23]. 从另外一个角度, 一个闭环的边界效应模型(BEM)被 Hu 提出, 当裂缝尖端远离试件的边界, 断裂参数的尺寸效应基本消失^[7-9]. 近年来, BEM 模型已经在混凝土材料被多次验证其正确性^[24-25]. 图7所示为三点弯梁当极限荷载 F_{max} 达到时截面的应力分布, Δa_e 为等效裂缝扩展长度, 它等于一个离散系数 β 乘平均骨料粒径 G . 对于混凝土材料, 本试验中使用的粗骨料最大骨料粒径为 10 mm, 根据理论预测模型, 综合考虑粗骨料与细骨料粒径的影响, $G \approx d_{max}/1.5 \approx 7$ mm. 假设在有限裂缝扩展长度的虚拟裂缝区粘结应力随着名义强度 σ_n 变化为一个常数. 根据图中力的平衡关系可以得出如下关系.

$$F_{max} + 0.5W = \frac{2b(h-a_0)(h-a_0+2\beta G)}{3L} \sigma_n \quad (1)$$

式中: W 为梁自重, b 为梁宽, h 为梁高, a_0 为初始裂缝长度, L 为梁的跨度.

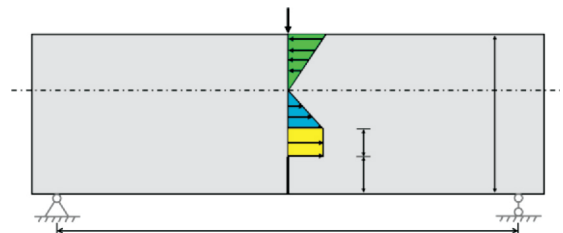
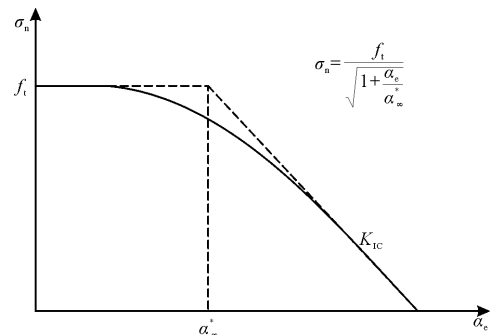
图7 当 F_{max} 达到时截面应力分布Fig. 7 Stress distribution in the cross-section when F_{max} is reached

图8展示的是 σ_n 随 a_e 变化的曲线图, 其中 a_e 是等效裂缝长度, 其用于描述裂缝尖端距离试件最近边界的距离. 根据 BEM, σ_n 可以表示为

图8 σ_n 随 a_e 变化曲线Fig. 8 Variation of σ_n with a_e

$$\sigma_n = \frac{f_t}{\sqrt{1 + \frac{a_e}{a_{\infty}}}} \quad (2)$$

$$a_e = \left(\frac{(1-a_0/h)^2 \cdot Y(a_0/h)}{1.12} \right)^2 \cdot a_0$$

$$= \left(\frac{(1-\alpha)^2 \cdot Y(\alpha)}{1.12} \right)^2 \cdot a_0 \quad (3)$$

式中: α 为缝高比等于初始缝长 a_0 与梁高 h 之间的比值. 对于跨高比为 4 的标准三点弯曲梁为

$$Y(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{\sqrt{\pi}(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}} \quad (4)$$

$$a_{\infty}^* = 0.25 \left(\frac{K_{IC}}{f_t} \right)^2 \approx 3G \quad (5)$$

结合公式(1)和(2)可得

$$f_t = \frac{F_{\max} + 0.5W}{A_e} \quad (6)$$

式中:

$$A_e = \frac{2bh^2(1-\alpha)(1-\alpha+2\beta G/h)}{3L\sqrt{1+\frac{a_e}{3G}}} \quad (7)$$

通过结合公式(5), 断裂韧性 K_{IC} 可以得到

$$K_{IC} = 2f_t \sqrt{3G} \quad (8)$$

2.3.2 f_t 和 K_{IC} 结果分析

从公式(6)和(7)可以看到, 三点弯试验梁的基本尺寸信息、平均骨料粒径 G 、离散系数 β 、缝高比以及最大承载力 F_{\max} 知道后, f_t 和 K_{IC} 都可以通过简单的公式得到求解. 利用公式(6)计算得到的不同温度后的 f_t 随初始裂缝长度 a_0 的曲线如图 9 所示, K_{IC} 随 a_0 的变化规律与 f_t 一致, 因为公式(8)所示两者成正比关系, 这里就不再叙述.

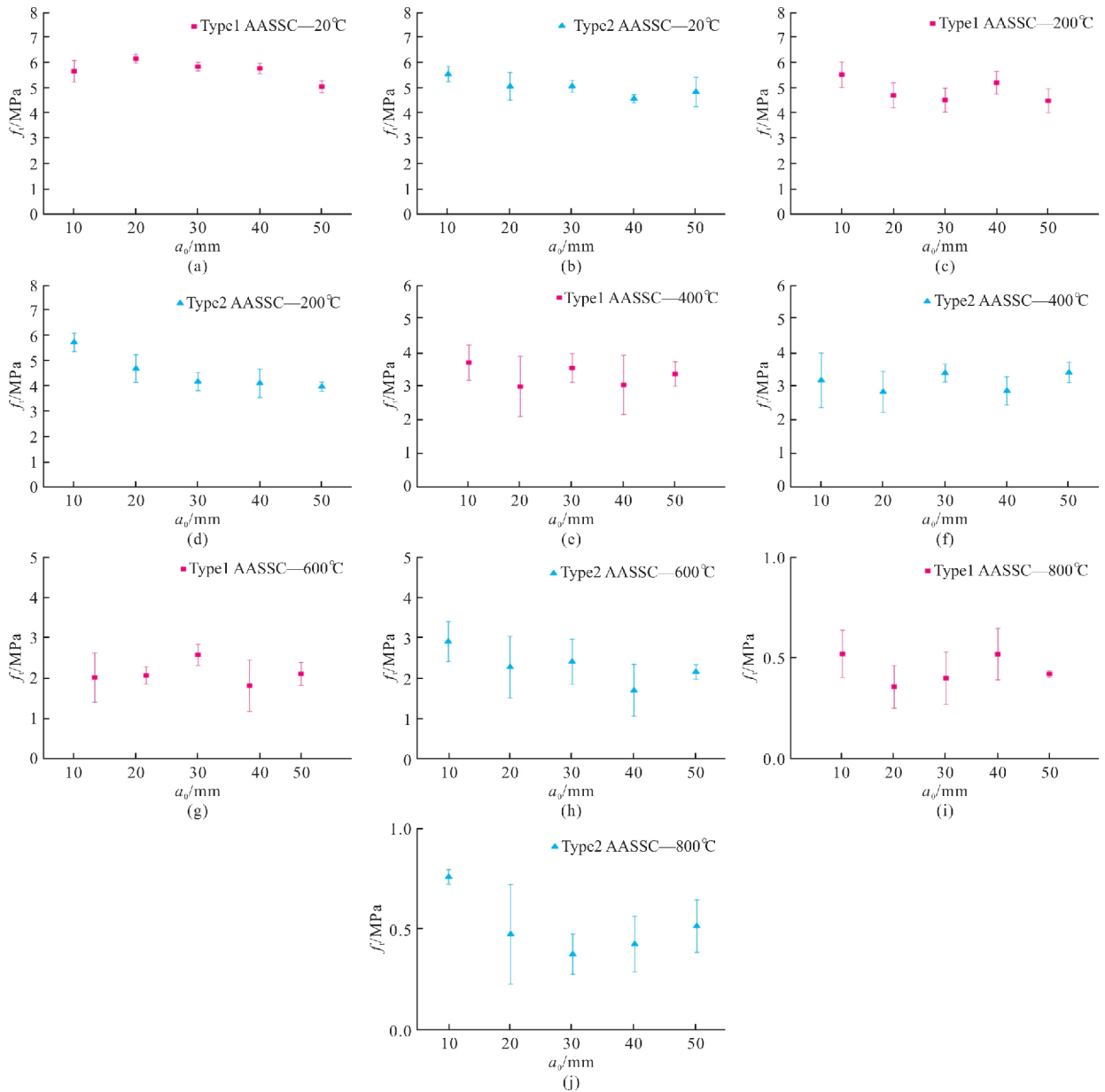


图9 不同高温下 f_t 随 a_0 的变化

Fig. 9 Variation of f_t with a_0 after exposure to different temperatures

如图9所示, f_t 基本随 a_0 水平波动变化, 这是因为混凝土材料的不均匀性导致的, 即使是同情况下的五个试件, 计算得出的 f_t 也有差距. 此外, 这种水平波动变化也说明了这一种尺寸的试件在恒温加热 180 min 后, 混凝土内外部达到了受热均匀的状态, 否则, 图中的散点不会均匀的波动变化, 会出现明显的折点.

图10所示为 f_t 随温度的变化曲线, 同样, K_{IC} 随温度变化曲线类似这里也不再赘述. 从图中可以看出, 两类 AASSC 随温度的升高, f_t 变化规律近似为一条负斜率的直线, 在 400 °C 之前, Type1AASSC 的 f_t 比 Type2AASSC 大, 600 °C 后 Type1AASSC 则相对小, 这与劈裂抗拉强度得出的规律一致. 图中的每一个数据点为每一类 AASSC 五种温度、五种缝高比共 25 个试件 f_t 计算结果的平均值, 并且添加了代表 95% 保证率上下限的误差棒. 表5展示了两种 AASSC 在不同高温温度下的 f_t 和 K_{IC} 的计算结果, 可以发现基于 BEM 计算得到的 f_t 明显高于相同温度下的劈裂抗拉强度 f_{ts} . 这是因为本文所提出的模型计算得出的抗拉强度为真实值, 而劈裂抗拉试验得到的拉伸强度为破坏截面上的平均强度.

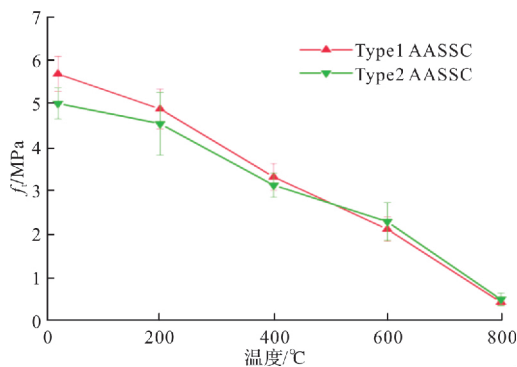


图10 f_t 随温度变化曲线

Fig. 10 Variation of f_t with temperature

表5 f_t 和 K_{IC} 的计算结果

Tab. 5 Results of f_t and K_{IC}

温度/°C	Type1AASSC		Type2AASSC	
	f_t	K_{IC}	f_t	K_{IC}
	/MPa	/(MPa · m ^{1/2})	/MPa	/(MPa · m ^{1/2})
20	5.684	1.647	5.008	1.452
200	4.878	1.414	4.541	1.316
400	3.319	0.962	3.128	0.907
600	2.12	0.614	2.291	0.664
800	0.443	0.128	0.51	0.148

3 结论

本文对两种 AASSC 进行了五种高温温度后抗压、抗拉与断裂性能的试验研究, 观察了其高温

后微观界面的形貌变化, 并最终基于 BEM 探究了该碱激发海砂混凝土高温后无尺寸效应的断裂参数的预测, 得到结论如下:

(1) 该 AASSC 具有明显的快凝早强的特点. 护龄期到达 7 d 时, 其抗压强度和劈裂抗拉强度可分别达到 28 d 的 80% 和 70%. 而且这种早期强度上涨的快慢与粉煤灰和矿粉掺量比没有明显关系. 此外, 本文两类 AASSC 混凝土在标准养护条件下进行养护, 有研究表明, 随着试件养护温度从 50 °C 到 90 °C, 混凝土 7 d 与 28 d 强度比从 50% 提高至 62%^[26]. 这说明高温养护有利于碱激发混凝土早期强度的发展;

(2) 在加热至 200 °C 后, 两种 AASSC 的立方体抗压强度有一个明显的上涨, 原因为未水化的矿粉和粉煤灰继续其水化反应, 从 SEM 图中也可以看到球状颗粒未水化的粉煤灰在 200 °C 高温后消失殆尽. 该两种 AASSC 的抗拉强度变化则从 200 °C 到 800 °C 过程中一直逐渐降低, 这是因为从 SEM 图中可以看到高温的作用劣化了碱激发浆体, 从而使碱激发浆体与骨料之间的粘结变弱, 导致了强度的降低. 粉煤灰和矿粉的微观化学成分对不同高温下混凝土的宏观力学性能也有影响, 矿粉较粉煤灰中含有更多的活性物质如氧化钙、二氧化硅、氧化铝, 所以常温、200 °C、400 °C 后 Type1AASSC 的强度高于 Type2AASSC, 而更好的温度对这些活性物质产生的水化产物比如 C-S-H 和 C-A-S-H 不利, 所以 600 °C 高温后 Type2AASSC 残余强度更高;

(3) 对于每种 AASSC, 其预测到的 f_t 和 K_{IC} 随 a_0 呈水平波动变化, 即随缝高比的增加没有明显的趋势变化, 这是在不同方向以及不同的试件材料的不均匀性导致的;

(4) 随着高温温度的升高, 每种 AASSC 的 f_t 都呈现负斜率的下降, 这与劈裂抗拉强度结果的规律不谋而合. 并且温度越高, 这种下降的程度越大因为其内部损伤的扩大. 在 400 °C 以下, 更高 GGBFS/FA 质量比的碱激发海砂混凝土预测得到的断裂参数值比低 GGBFS/FA 质量比的混凝土高; 超过 400 °C 后, 前者强度损失更大并且其残余强度明显低于后者.

参考文献 References

- [1] 2021 年 1~10 月份水泥行业运行情况[J]. 中国建材, 2021(12):84.
Cement industry operation from January to October 2021[J]. China Building Materials, 2021(12):84.
- [2] 傅博. 碱矿渣混凝土耐高温性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

- FU Bo. Study on the high temperature resistance of alkali slag concrete[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [3] 朱晶. 碱矿渣胶凝材料耐高温性能及其在工程中的应用基础研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- ZHU Jing. Basic research on the high temperature resistance of alkali slag cementitious materials and its application in engineering[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [4] MANJUNATH R, MATTUR C, NARASIMHAN K M Umsha. Studies on high performance alkali activated slag concrete mixes subjected to aggressive environments and sustained elevated temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2019, 229: 1-19.
- [5] Serhat Çelikten, Mustafa Sarıdemir, İbrahim Özgür Deneme. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag: fly ash mortars exposed to high temperature [J]. Construction and Building Materials, 2019, 217: 50-61.
- [6] LI Yinglei, ZHAO Xiaoling, Singh Raman R K, et al. Thermal and mechanical properties of alkali-activated slag paste, mortar and concrete utilising seawater and sea sand [J]. Construction and Building Materials, 2018, 159: 706-724.
- [7] HU X Z, WITTMANN F H. Fracture energy and fracture process zone [J]. Materials and Structures, 1992, 25(6): 319-326.
- [8] HU Xiaozhi, FOLKER Wittmann. Size effect on toughness induced by crack close to free surface [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 65 (2): 209-221.
- [9] HU Xiaozhi, DUAN Kai. Size effect and quasi-brittle fracture: the role of FPZ [J]. International Journal of Fracture, 2009, 154(1/2): 3-14.
- [10] HU Xiaozhi, DUAN Kai. Size effect: Influence of proximity of fracture process zone to specimen boundary [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 74(7): 1093-1100.
- [11] Standard practice for the preparation of substitute ocean water: ASTM D1141-98[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T50081[S]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2019.
- MHURO. Standard for mechanical properties of ordinary concrete: GB/T50081[S]. Beijing: China Academy of Building Research, 2019.
- [13] SONG S, SOHN D, JENNINGS H M, et al. Hydration of alkali-activated ground granulated blast furnace slag [J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(1): 249-257.
- [14] Fernández-Jiménez 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.
- [15] Pawel Sikora, Krzysztof Cendrowski, Mohamed Abdelrahman, et al. The effects of seawater on the hydration, microstructure and strength development of Portland cement pastes incorporating colloidal silica [J]. Applied Nanoscience, 2019, 10: 2627-2638.
- [16] WANG Junjie, LIU Engui LI Liang. Multiscale investigations on hydration mechanisms in seawater OPC paste [J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 891-903.
- [17] NASSER K W, MARZOUK H M. Properties of mass concrete containing fly ash at high temperatures [J]. Journal Proceedings, 1979, 76(4): 537-550.
- [18] ZUDA L, PAVLÍK Z, ROVNANÍKOVÁ P, et al. Properties of alkali activated aluminosilicate material after thermal load [J]. International Journal of Thermophysics, 2006, 27(4): 1250-1263.
- [19] DEFALLA R D. Effect of exposure to elevated temperatures on geopolymer concrete properties [J]. International Journal of Civil Engineering and Technology, 2019, 10(10): 448-461.
- [20] Gkhan Kürklü. The effect of high temperature on the design of blast furnace slag and coarse fly ash-based geopolymer mortar [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 92: 9-18.
- [21] SUSAN A Bernal, Erich D Rodríguez, Ruby Mejía de Gutiérrez, et al. Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends [J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(16): 5477-5486.
- [22] SASUI Sasui, KIM Gyuyong, NAM Jeongsoo, et al. Effects of waste glass sand on the thermal behavior and strength of fly ash and GGBS based alkali activated mortar exposed to elevated temperature [J]. Construction and Building Materials, 2022, 316: 1-18.
- [23] Zdeněk P Bažant, YU Qiang. Universal size effect law and effect of crack depth on quasi-brittle structure strength [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(2): 78-84.
- [24] YANG Shutong, LI Linzhen, SUN Zhongke, et al. A closed-form fracture model to predict tensile strength and fracture toughness of alkali-activated slag and fly ash blended concrete made by sea sand and recycled coarse aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2021, 300: 1-16.
- [25] YANG S, ZHANG X, YU M, et al. An analytical approach to predict fracture parameters of coral aggregate concrete immersed in seawater [J]. Ocean Engineering, 2019, 191: 1-14.
- [26] 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. Study on the mechanical properties of alkali-activated fly ash cementitious materials [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.