

玻化微珠保温混凝土高温后性能劣化及微观结构

姚韦靖, 庞建勇*

(安徽理工大学 土木建筑学院, 淮南 232001)

摘要: 配制普通混凝土(NC)和玻化微珠保温混凝土(GHB/NC), 研究从常温升温至 1 000℃ 高温后表现现象变化、质量、抗压强度损失等性能的劣化过程, 同时讨论超声波无损检测法评判混凝土高温后性能的普适性, 对比分析相对波速、损伤度与受热温度、抗压强度损失率的关系, 利用 SEM 观察不同高温后试件微观结构变化。结果表明: 采用相对波速、损伤度评价混凝土高温后性能具有良好相关性, 回归公式拟合度较高; 随温度升高, NC 和 GHB/NC 混凝土内部损伤逐步加剧, 水泥胶凝受热分解、水分散失等在试件表面和内部产生空隙、裂纹并相互贯通, 玻化微珠、粗骨料与水泥有界面黏结力逐步减弱甚至丧失, 造成宏观力学性能劣化, 抗压强度损失率增大。升温至 800℃ 后 NC 强度损失 72.3%, GHB/NC 强度损失 74.6%, 1 000℃ 时基本丧失承载能力。

关键词: 玻化微珠保温混凝土; 高温; 超声波无损检测; 性能劣化; 微观分析; 界面过渡区

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2019)12-2932-10

Performance degradation and microscopic structure of glazed hollow bead insulation normal concrete after exposure to high temperature

YAO Weijing, PANG Jianyong*

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The normal concrete (NC) and glazed hollow bead insulation normal concrete (GHB/NC) were made for studying the process of performance degradation from normal temperature to 1 000℃, which including changes in apparent phenomena, loss of mass and compressive strength. Simultaneously, the adaptation of ultrasonic test in evaluating the performance of concrete after exposure to high temperature was investigated. The relationships between relative velocity, damage degree and temperature, compressive strength loss rate were comparative analyzed. The micro-structure changes of concrete specimens after exposure to different high temperatures were observed by SEM. The results show that it has good correlation of the parameters of relative velocity and damage degree in evaluating the performance of concrete after high temperature. The regression formula has a good fitting degree. With the rise of heat temperature, the internal damage of concrete is gradually intensified, cement hydrates decomposes and water disperses, which causes voids, cracks and interpenetration occurred on the surface and inside of the specimens. The bonding force between glazed hollow bead, coarse aggregates and cement paste is gradually weakened or even lost. These cause deterioration of macroscopic mechanical properties and increasing of compressive strength loss rate of GHB/NC and NC. After experiencing the high temperature of 800℃, the losses in compressive strength of NC and GHB/NC are 72.3% and 74.6%, and the bearing capacity is almost lost after exposure to 1 000℃.

Keywords: glazed hollow bead insulation normal concrete; high temperature; ultrasonic non-destructive testing; performance deterioration; microscopic analysis; interfacial transition zone

收稿日期: 2018-10-25; 录用日期: 2019-01-07; 网络出版时间: 2019-02-27 16:09

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190118.001>

基金项目: 淮南市科技计划重大创新平台及高校创新人才团队专项(2017A055); 安徽理工大学博士研究生创新基金(2017CX1006)

通讯作者: 庞建勇, 博士, 教授, 研究方向为水泥混凝土类材料 E-mail: pangjyong@163.com

引用格式: 姚韦靖, 庞建勇. 玻化微珠保温混凝土高温后性能劣化及微观结构[J]. 复合材料学报, 2019, 36(12): 2932-2941.

YAO Weijing, PANG Jianyong. Performance degradation and microscopic structure of glazed hollow bead insulation normal concrete after exposure to high temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(12): 2932-2941 (in Chinese).

目前,我国建筑能耗在全国能源消费中占很大比重并呈上升趋势。因此建筑节能是当前广泛关注的课题,其关键在提高建筑围护墙体的隔热和保温性能,以减少室内热量损失,节约能源^[1]。常用的外墙外保温体系包括以聚苯颗粒和聚苯板等有机保温材料为主的保温体系及玻化微珠保温砂浆和膨胀蛭石保温砂浆等无机保温材料为主的保温体系^[2-3]。大量工程实践证明,有机材料耐久性、耐火性差,而无机材料具有隔热防火阻燃、耐高温、绿色环保等优良特性,逐渐受到广泛关注和应^[4]。

玻化微珠无机外墙保温材料的研究集中于保温砂浆性能的讨论,如龚建清等^[5]研究了不同水胶比对玻化微珠保温砂浆性能的影响;朱江等^[6]探讨了聚丙烯纤维掺量对玻化微珠复合保温材料力学性能和软化系数的影响;吴文杰等^[7]分析了保温砂浆各组分对材料性能的影响。但保温砂浆作外墙保温材料增加了施工工序,为此相关学者提出既能够有效承重、又具有隔热功能的玻化微珠保温混凝土材料,MA等^[8]、ZHAO等^[9]、ZHANG等^[10]、代学灵等^[11]对此开展了一系列研究,包括该材料各项宏观物理力学性能、保温隔热能力、微细观特性等,及作为结构自保温墙体的探索与实践。然而对经历高温火灾后,玻化微珠自保温混凝土的研究还较少,利用超声波无损检测评价建筑结构内部损伤是一种方便快捷、可重复性高的良好手段^[12],由于玻化微珠掺入水泥砂浆作细骨料使其与水泥石的粘结与常规混凝土存在差异,超声波传播特性也有所不同,而以超声波法评价玻化微珠混凝土高温后性能的公开报道较少。相关研究表明,经高温后水泥浆体愈加疏松多孔,造成宏观裂缝产生、发展^[13-14],但玻化微珠与水泥石特有的嵌固界面结构与普通混凝土有所不同^[15],高温后界面区结构变化、内部劣化过程和机制值得关注。

为此,本文测试了玻化微珠保温混凝土(GHB/

NC)经历高温处理后质量、强度损失,采用非破损超声波检测技术,以相对波速和损伤度作评价指标,分析不同温度作用后材料内部损伤和强度损失率,利用扫描电镜观察试件经高温作用后微观结构变化。从宏观和微观角度探索玻化微珠保温混凝土高温劣化机制。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

水泥采用淮南八公山牌P·C 42.5级复合硅酸盐水泥,其3天和28天抗压强度分别为29.99 MPa和49.75 MPa,淮南平圩电厂产Ⅰ级粉煤灰,其化学成分含量见表1;细骨料采用中砂,细度模数为2.8;采用河南信阳金华兰公司产玻化微珠作为轻质细骨料,其主要性能指标见表2;粗骨料采用石灰质碎石,粒径为5~15 mm连续级配;外加剂为陕西秦奋建材产HPWR型高性能减水剂。

玻化微珠(GHB)是一种非金属轻质保温绝热材料,由松脂岩矿经开采后破碎、筛分、高温瞬时燃烧膨胀玻化形成,内部多孔,表面玻化封闭,呈球状细粒径颗粒。采用扫描电镜(SEM)观察的玻化微珠的微观形貌见图1。可见内部呈蜂窝状多孔结构,该种特殊结构延长了热量在材料内部的传递路径,增加内部孔隙,使热量既在材料中传播又在空气中传递,而空气本身即为很好的隔热材料,导热系数仅为0.023 W/(m·K)^[16],从而增加能量耗散损失,提高隔热能力;而外表面玻化封闭呈球状,但在混凝土拌和过程中,极易遭受挤压、振动等破碎,造成强度损失。

1.2 混凝土配合比设计

依据JGJ55—2011^[17]设计混凝土配合比,实验前对玻化微珠进行1 h吸水处理,经实验试配相应调整水灰比以保证用水量一致,具体数据见表3,其中NC(Normal concrete)为C30普通混凝土,GHB/NC(Glazed hollow bead insulation normal concrete)为玻化微珠保温混凝土,其基本性能测试

表 1 粉煤灰化学成分组成

Table 1 Chemical composition of fly ash

wt%

Composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	Ignition loss
Content	53.26	34.72	4.07	2.47	0.39	1.9	4.07

表 2 玻化微珠性能指标

Table 2 Performance indicators of glazed hollow bead

Particle size/mm	Bulk density/(kg·m ⁻³)	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Cylinder compressive strength/MPa	Thermal conductivity/(W·(m·K) ⁻¹)	Refractoriness/℃	Volume loss rate at 1 MPa/%
0.5—1.5	80—120	80—130	≥150	0.032—0.045	1 280—1 360	38—46

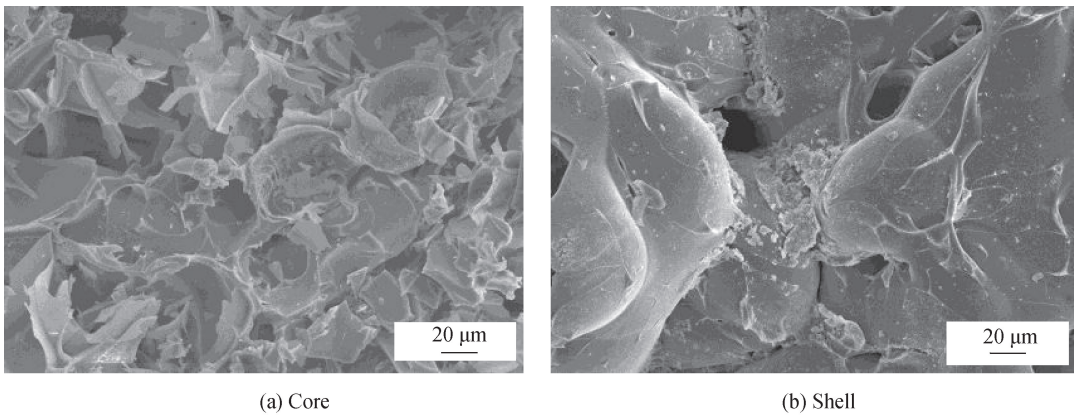


图1 玻化微珠(GHB)微观结构形貌
Fig.1 Micro-structure of glazed hollow bead(GHB)

表 3 混凝土配合比

Table 3 Mix proportions of concretes

Concrete	Cementing material		Gravel	Fine aggregate		Water	Water reducer	Water cement ratio
	Cement	Fly ash		Sand	Glazed hollow bead			
NC	421	47	856	856	—	177.84	4.68	1 : 0.38
GHB/NC	429	47	856	571	100	168.48	4.68	1 : 0.36

Notes: NC—Normal concrete; GHB/NC—Glazed hollow bead insulation normal concrete.

表 4 混凝土基本性能

Table 4 Performances of concretes

Concrete	Workability		Compressive strength/MPa		28 d apparent density/(kg·m ⁻³)	28 d moisture content/%	Thermal conductivity/(W·(m·K) ⁻¹)
	Slump/mm	Slump flow/mm	3 d	28 d			
NC	175	350	15.01	36.80	2 272	1.10	1.63
GHB/NC	200	410	8.12	26.13	2 102	1.73	1.22

结果见表 4。可知，掺入玻化微珠轻集料后，混凝土表观密度、抗压强度、导热系数均有不同程度降低，其中 28 天的抗压强度下降约 29%，导热系数下降约 26%，由于玻化微珠良好的保水性，含水率有所提高，经预湿处理使拌和物工作性、流动性有较大提高，符合当前建筑材料轻质、工作性佳、保温等多功能性的发展趋势。

1.3 实验方法

采用尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块，成型 1 天后拆模，在标准养护条件下(相对湿度≥95%，温度为(20±1)℃)养护至 28 天。实验前，将所有试块放入(105±5)℃的烘箱内烘干 24 h，以排除试块含水对实验的影响。采用箱式电阻炉加热试块，设计目标温度为 100~1 000℃，温度间隔为 100℃，加热速率为 10~15℃/min，升至目标温度后恒温 2 h，保证炉温和试件内部温度一致，炉内冷却至 100℃左右，取出炉膛静置 48 h 以上测定试件各项性能。

采用北京康科瑞公司产 NM-4B 非金属超声检测仪测定各温度下试件的声速、主频和幅值，每个试件布置 2 个相对测点计算均值，超声波频率为 50 kHz，设置发射电压为 500 V，采样周期为 0.4 μs；超声测定后，使用长春试验机研究所产 CSS-33000 压力机进行受压破坏实验，并根据高温后各试件与干燥处理下抗压强度之比，计算强度损失率；最后，从压碎试块中取样，采用日立产 S-3400N 型扫描电子显微镜，选取水泥石、玻化微珠与水泥石连接部分做界面区微观形貌观察。

2 结果与讨论

2.1 混凝土高温表现现象

观察发现，NC 和 GHB/NC 两种混凝土试件经高温后表现现象类似，见表 5。可见，随温度升高外观颜色由青灰色逐渐加深而后变浅为灰白色至白色，在低于 300℃时，试件表现无明显变化，敲击声音清脆，无裂纹产生；300~500℃时，试件颜色加深，呈微褐色、褐色，敲击声音趋平缓，出现较

表 5 各温度下 NC 和 GHB/NC 混凝土试件表现现象

Table 5 Experimental phenomena of NC and GHB/NC specimens after exposure to different temperatures

Temperature/℃	Apparent color of specimen	Knocking sound of specimen	Crack, scaling and loose
20	Cinerosus	Clear and melodious	None
100	Cinerosus	Clear and melodious	None
200	Cinerosus	Slightly clear and melodious	None
300	Slightly brown	Slightly clear and melodious	None
400	Medium brown	Gentle	Minor crack
500	Brown	Gentle	Minor crack
600	Grey white	Slightly low	Obvious crack
700	Grey white	Slightly low	Obviously crack, mild loose
800	White	Low	Obviously crack, a small number of long and wide cracks, increasing loose
900	White	Low	Coarse crack, peeling and scaling, obviously loose
1 000	White	Low	Coarse and through cracks, broken, missing corners, looseness

少细裂纹,其原因在于该温度段中粗骨料本身无明显变化,裂纹和变形主要集中于粗骨料与水泥砂浆基体界面处及水泥砂浆基体内部,因而出现细小裂纹,此外混凝土中水化铁酸钙与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成褐色 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀致使试件呈微褐色^[18]。

高于 600℃ 时出现明显裂纹,外观呈灰白色,敲击声音低沉;800℃ 时,试件泛白,出现贯通的长裂纹;超过 900℃ 时,出现大量掉皮、剥落现象,静置 48 h,破碎、缺角现象严重,整体结构疏松,强度下降严重,其原因为石灰岩碎石经 600℃ 高温后分解为 CO_2 、水泥砂浆等材料高温后体积膨胀、碎石与水泥砂浆基体热膨胀系数不同等致使试件裂缝增大、强度损失^[19-20]。

2.2 高温下原材料与混凝土的质量损失

图 2 为各主要原材料、混凝土试件随温度变化的质量损失。

碎石在温度低于 600℃ 时质量基本保持不变,在 600~800℃ 时质量损失约 5%,在 900℃ 时质量出现大幅下降,至 1 000℃ 时质量损失达 40%,而砂经历高温后质量损失较小。由于碎石的主要成分

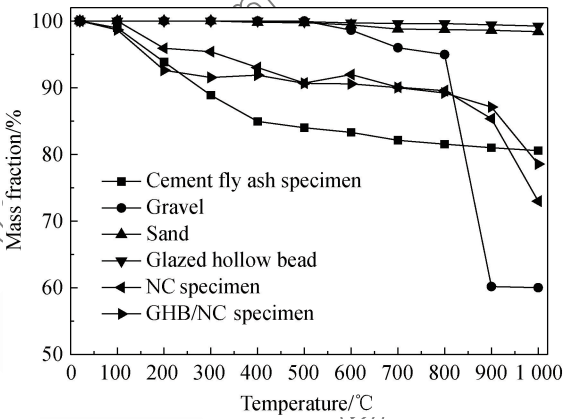


图 2 高温后原材料和混凝土质量损失

Fig. 2 Mass loss of raw material and concrete after exposure to high temperature

是 CaCO_3 , 在温度为 600~820℃ 时分解为 CaO 和 CO_2 , 因而产生明显质量降低^[21]。

玻化微珠在经历 1 000℃ 高温后,其质量损失率小于 1%,强度和几乎不受影响,这是由于玻化微珠是经特殊的膨化烧法加工而成,其本身的加工温度超过 1 000℃,对比碎石与玻化微珠经 1 000℃ 高温处理后的外观特征(图 3),可见碎石

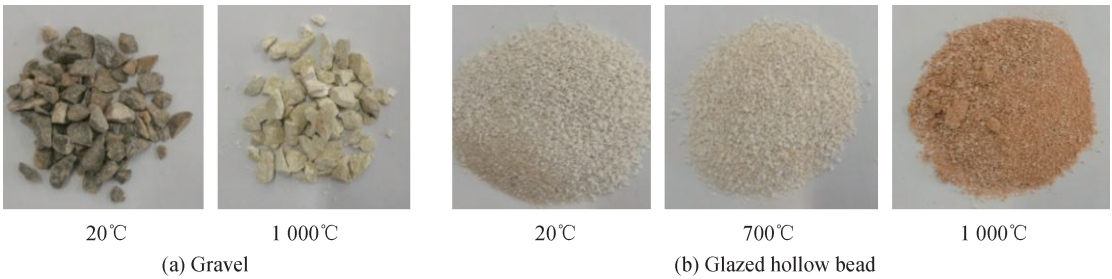


图 3 高温后碎石和玻化微珠外观变化

Fig. 3 Appearance changes of gravel and glazed hollow bead after exposure to high temperature

已由青白色变为雪白色,强度损失大,而玻化微珠由白色颗粒,加热至 700℃时无明显变化,继续升温至 1 000℃,逐渐变为红色颗粒并伴有少量结块现象,图 4 为 1 000℃高温后玻化微珠微观结构,与常温微观形貌(图 1)比对,两者几乎无变化,说明该材料是极好的耐高温材料。

两组试件经历高温后质量损失趋势一致,在温度低于 200℃时质量损失小于 5%,温度低于 600℃时质量损失控制在 10%,这时质量损失主要由水泥胶凝体质量损失引起,温度超过 600℃时质量进一步下降,温度在 800℃时质量出现大幅度降低,NC

试件经 1 000℃高温处理后质量损失达 27.01%,GHB/NC 在1 000℃处理后,质量损失为 21.44%,较 NC 为优,体现出玻化微珠轻集料较砂石耐高温的优势。

2.3 混凝土高温内部损伤

采用超声测试对高温处理后试块内部损伤进行评判,超声传播特性受粗细骨料种类、粒径、水泥品种及用量的影响,参照文献[12],采用相对波速、损伤度、相对主频和相对幅值作为评价参数计算如下:

$$v_R = v_T/v_0$$

(1)

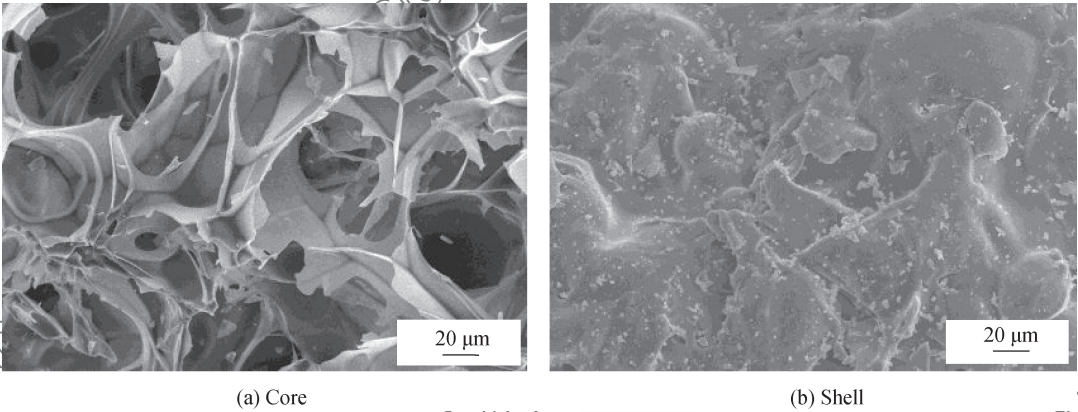


图 4 1 000℃高温后玻化微珠微观结构形貌

Fig. 4 Micro-structure of glazed hollow bead after exposure to high temperature of 1 000℃

表 6 混凝土超声实验结果处理

Table 6 Ultrasonic test results processing for concrete

Group	Temperature/ ℃	Relative velocity v_R	Damage degree D	Relative dominant frequency f_R	Relative amplitude A_R	Compressive strength loss rate/%
NC	100	0.976	0.047	0.997	1.599	−6.5
	200	0.886	0.215	0.997	1.545	−11.2
	300	0.773	0.403	1.029	1.639	−20.5
	400	0.641	0.589	1.115	1.537	−24.5
	500	0.539	0.709	0.951	1.662	12.7
	600	0.375	0.859	1.006	1.649	26.2
	700	0.295	0.913	0.987	1.518	38.6
	800	0.277	0.923	0.985	1.342	72.3
	900	0.209	0.956	0.377	0.932	79.0
	1 000	0.176	0.969	0.219	0.756	88.5
GHB/NC	100	0.970	0.059	1.009	0.996	−2.7
	200	0.811	0.343	1.019	1.103	−20.6
	300	0.599	0.641	0.975	1.086	−14.8
	400	0.510	0.740	0.990	1.084	−2.1
	500	0.367	0.865	0.997	1.038	20.5
	600	0.324	0.895	1.004	1.062	21.7
	700	0.302	0.909	0.968	0.926	57.7
	800	0.234	0.945	0.519	0.707	74.6
	900	0.185	0.966	0.087	0.660	85.8
	1 000	0.127	0.984	0.104	0.486	88.2

Note: Negative value in the compressive strength loss rate indicates an increase in strength at the target temperature.

$$D = 1 - (v_T/v_0)^2 \tag{2}$$

$$A_R = A_T/A_0 \tag{3}$$

$$f_R = f_T/f_0 \tag{4}$$

$$\Delta F_{cu} = 1 - F_{cuT}/F_{cu0} \tag{5}$$

式中： v_R 为相对波速； v_T 为试件高温后波速 (m/s)； v_0 为试件高温前波速 (m/s)； D 为试件损伤度； A_R 为相对幅值； A_T 为高温后首波幅值 (dB)； A_0 为高温前首波幅值 (dB)； f_R 为相对主频； f_T 为高温后首波主频 (kHz)； f_0 为高温前首波主频 (kHz)； ΔF_{cu} 为抗压强度损失率； F_{cuT} 为高温损伤后试件抗压强度值 (MPa)； F_{cu0} 为高温处理前试件抗压强度值 (MPa)。

对实测原始数据进行处理, 结果见表 6。可看出, 相对幅值和相对主频在受热温度低于 800℃ 时变化不大, 经历 800℃ 以上高温后, 幅值和主频有较大幅度下降, 说明这两个参数对于评估试件受热材料内部性质差异的反映不敏感, 不适宜作评估参数。

两类混凝土试件经不同温度作用后, 相对波速、损伤度与受热温度关系如图 5 所示。可见, 混凝土试件相对波速和损伤度与受热温度具有良好相关性, 随受热温度升高, 相对波速逐渐下降, 损伤

度不断增大, 原因在于高温后试件体积膨胀, 原材料受损, 试件密实度下降, 波速逐渐降低, 反映为内部损伤不断积累。采用合适的函数进行回归分析, 拟合结果见表 7, 其拟合相关系数均大于 0.95, 实验值与拟合值吻合度较高, 说明采用相对波速和损伤度评估材料高温作用后内部损伤合理可行。

2.4 混凝土高温抗压强度损失

由表 6 抗压强度损失率可知, 两类混凝土经高温作用后强度下降趋势一致, 在温度低于 400℃ 时, 由于各试件经历高温蒸压养护作用, 混凝土内部仅发生结晶水逸散, 孔结构未发生明显改变, 产生强度较高的 $CaCO_3$, 加强了胶体同骨料的咬合力, 故抗压强度较常温时有所提高, NC 在 400℃ 处理后强度提高 24.5% 至最大, GHB/NC 在 200℃ 处理后强度最大, 提高 20.6%。

400℃ 后, 各试件随温度升高抗压强度大幅下滑, 这是由于混凝土内部孔结构严重粗化, C—S—H 凝胶在温度高于 600℃ 后显著分解而失去胶结作用, 水泥收缩与碎石骨料软化膨胀造成裂缝扩展、贯通。温度高于 800℃ 后强度损失近 80%, 水泥水化产物和石灰质碎石进一步分解, 内部水蒸气形成高蒸气压导致浆体开裂, 甚至高温爆裂, 经历

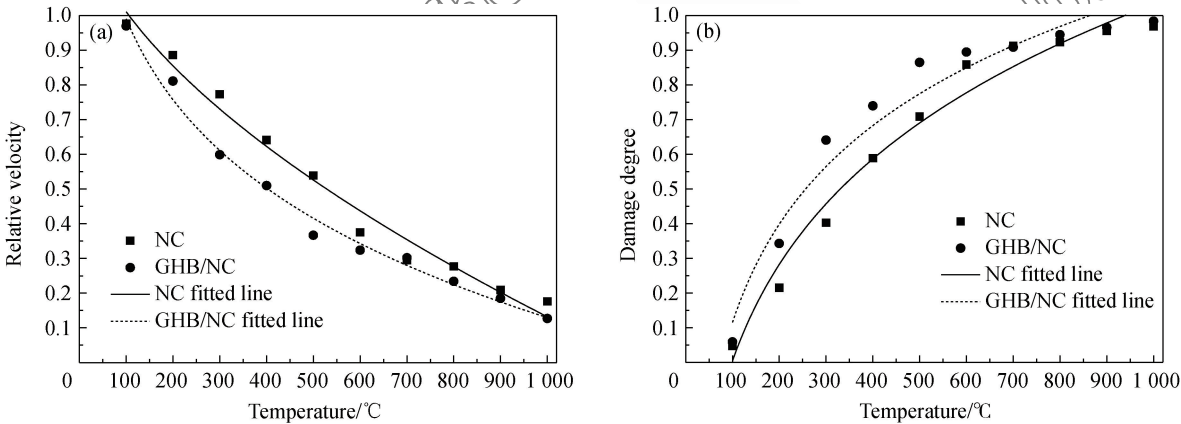


图 5 NC 和 GHB/NC 高温后超声参数与受热温度的关系

Fig. 5 Relationship between ultrasonic parameters and temperature of NC and GHB/NC after exposure to high temperature

表 7 NC 和 GHB/NC 超声参数与受热温度拟合结果

Concrete type	Ultrasound parameter	Fitting formula	R^2
NC	Relative velocity v_R	$v_R = -22.15 \frac{T^{0.58}}{1000} + 1.33$	0.98
	Damage degree D	$D = 1.64T^{0.129} - 2.97$	0.97
GHB/NC	Relative velocity v_R	$v_R = -1397.62 \frac{T^{0.13}}{1000} + 3.51$	0.99
	Damage degree D	$D = 61.29T^{0.006} - 63.03$	0.95

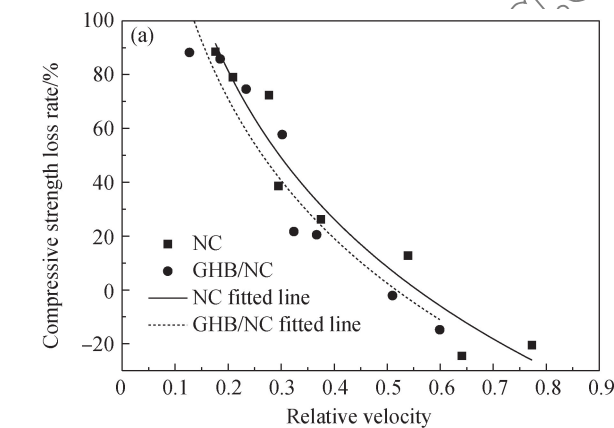
Note: T—Temperature.

1 000℃ 高温后,水泥浆体松散,试件几乎不成型,两类混凝土基本失去承载能力。

2.5 混凝土内部损伤与强度损失的关系

两类混凝土从常温升温至 1 000℃,强度经历了先略提高而后逐步降低的过程,而超声波传播受多种因素影响,并未反映出这一变化规律,因此讨论相对波速、损伤度和强度损失率的关系暂不考虑该温度区段影响,经计算,扣除 100~200℃ 温度区段拟合效果最优。

图 6 为两类混凝土相对波速、损伤度随受热温



度变化的实验数据和拟合效果。分别选用合适的函数进行回归分析,所得结果见表 8。拟合相关系数均大于 0.90,拟合结果较优,说明采用相对波速、损伤度评判强度损失率合理可行。

2.6 混凝土微观结构性能劣化

图 7 为 NC 水泥浆体常温下微观结构。可见水泥浆体间结合紧密、完整、连续,存在大量 C—S—H 凝胶,放大观察可见针状钙矾石 AFt 晶体和 Ca(OH)₂。

图 8 为 NC 经 200~400℃ 后的微观形貌。由图 8(a)可见,经 200℃ 后水泥水化浆体结构基本完好,

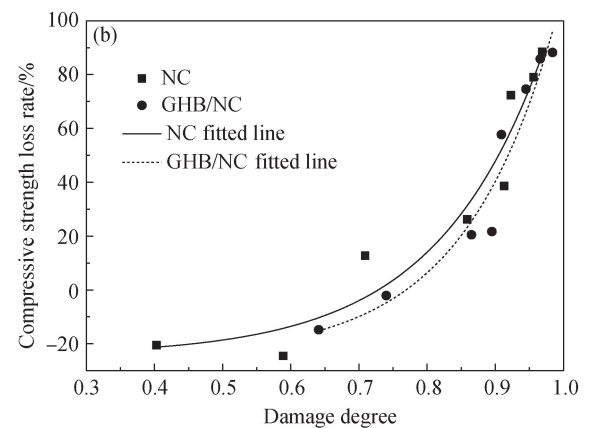


图 6 NC 和 GHB/NC 高温后超声参数与抗压强度损失率的关系

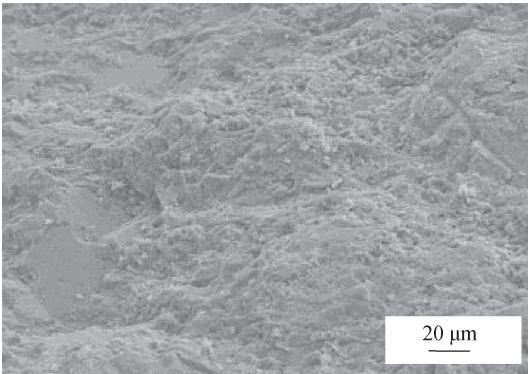
Fig. 6 Relationship between ultrasonic parameters and compressive strength loss rate of NC and GHB/NC after exposure to high temperature

表 8 NC 和 GHB/NC 超声参数与抗压强度损失率拟合结果

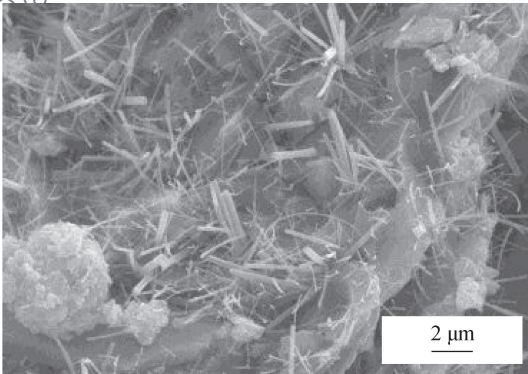
Table 8 Fitting results between ultrasonic parameters and compressive strength loss rate of NC and GHB/NC

Concrete type	Ultrasound parameter	Fitting formula	R ²
NC	Relative velocity v_R	$\Delta F_{cu} = -79.49 \ln v_R - 46.53$	0.93
	Damage degree D	$\Delta F_{cu} = 0.244 e^{6.32D} - 24.36$	0.92
GHB/NC	Relative velocity v_R	$\Delta F_{cu} = -74.74 \ln v_R - 49.32$	0.88
	Damage degree D	$\Delta F_{cu} = 0.086 e^{7.36D} - 24.83$	0.92

Note: ΔF_{cu} —Compressive strength loss rate.



(a) Intact slurry structure



(b) Acicular ettringite (AFt)

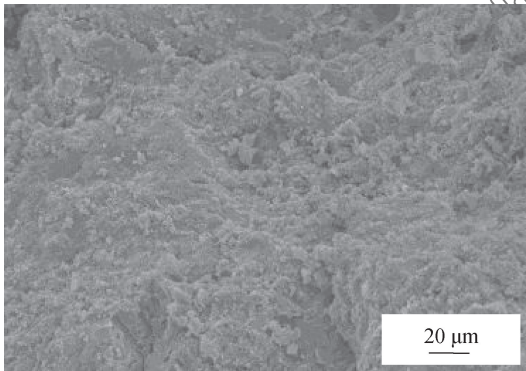
图 7 常温下 NC 水泥浆的微观形貌

Fig. 7 Micro-structures of NC cement slurry at room temperature

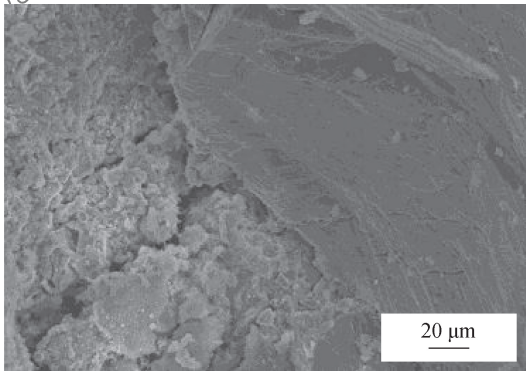
出现部分酥松迹象, 但各物相基本正常; 由图 8(b) 可见, 经 400℃ 高温后, 出现浆体酥松, 凝胶收缩、集料与浆体分离等现象。在该温度段下, 自由水、毛细孔水、C—S—H 凝胶吸附水散失, 促进水泥水化反应和火山灰反应继续进行, 形成类似“蒸压养护”作用, 致使混凝土试件强度较常温有所提高, 相关文献也体现出这一规律^[21-23]。

图 9 为 NC 经 600~1 000℃ 高温后的微观形

貌。由图 9(a) 可见, 600℃ 后大量水分散失, 胶凝表面出现明显水分散失后留下的小孔, 水泥浆体疏松, 凝胶分解, 产生裂缝、分层现象, 宏观表现为试件泛白, 裂纹明显增多; 图 9(b) 表明 800℃ 后各物相间分散加剧; 由图 9(c)~9(d) 可见, 1 000℃ 后浆体松散进一步加剧、连续性差、物相间分散严重、分解部位已连成区域、裂隙、孔洞, 宏观上出现大量贯通裂纹, 体积膨胀, 内部密实度、波速下降。

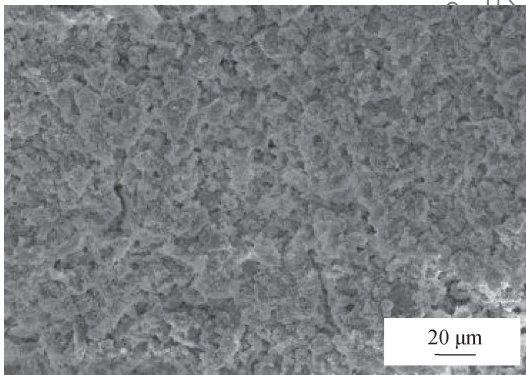


(a) Slurry structure at 200℃

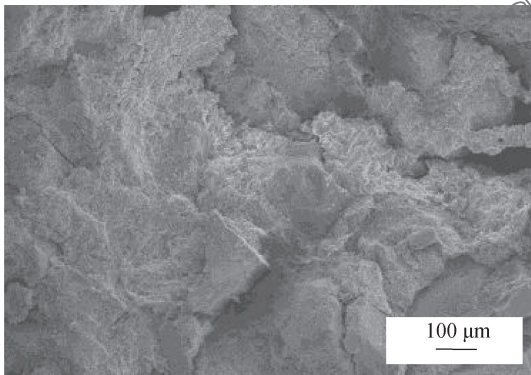


(b) Separation at aggregate and slurry at 400℃

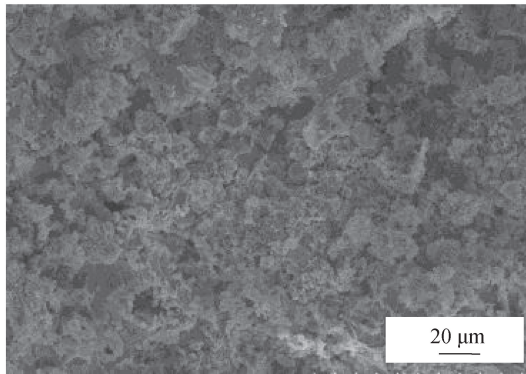
图 8 温度为 200℃ 和 400℃ 时 NC 的微观形貌
Fig. 8 Microstructures of NC after exposure to 200℃ and 400℃



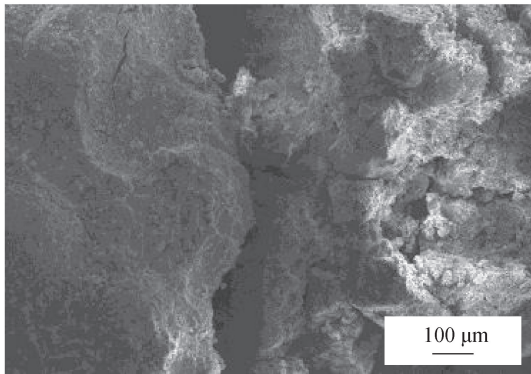
(a) Slurry structure at 600℃



(b) Phase dispersion at 800℃



(c) Slurry structure at 1 000℃



(d) Phase dispersion at 1 000℃

图 9 温度为 600℃、800℃、1 000℃ 时 NC 的微观形貌
Fig. 9 Microstructures of NC after exposure to 600℃, 800℃ and 1 000℃

GHB/NC 以特有的界面过渡区显著区别于 NC, 图 10 为 GHB/NC 界面区经高温处理后微观结构形貌劣化过程。可见, 常温下水泥石与玻化微珠结合致密, 水泥浆体进入玻化微珠表层孔隙, 形成紧密的两相机械啮合状结构, 水泥浆体密实, 水化产物状态良好; 200~400℃ 时界面区出现失水, 水分蒸发后水泥浆体留下孔洞等缺陷, 但界面区的机械啮合状结构未被破坏, 宏观表现为强度略有提高; 进一步升温至 600~1 000℃, 水泥水化浆

体开始分解、酥松、裂纹纵横交错, 产生明显裂隙、孔洞并相互贯穿, 界面区粘结力逐步减弱。

此外石灰质碎石和水泥石交界区经高温后碎石与水泥石脱离, 界面粘结力丧失。正是由于粗骨料随温度升高而软化膨胀、水泥水化产物受热分解、劣化等综合作用造成试件强度大幅下降, 经 800℃ 处理后 GHB/NC 强度损失 74.6%, NC 强度损失 72.3%, 经 1 000℃ 处理后 GHB/NC 强度损失 88.2%, NC 强度损失 88.5%。

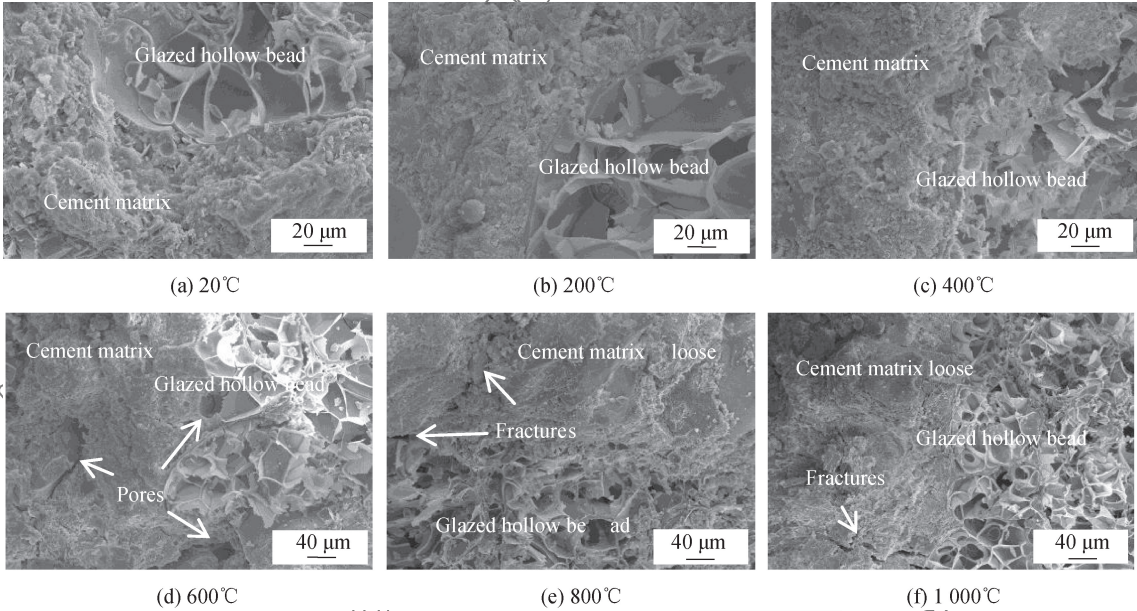


图 10 高温后 GHB/NC 玻化微珠与水泥石界面过渡区的微观形貌

Fig. 10 Microstructures of interfacial transition zone of GHB/NC after exposure to different temperatures

3 结 论

对普通混凝土 (Normal concrete, NC) 和玻化微珠保温混凝土 (Glazed hollow bead insulation normal concrete, GHB/NC) 高温后力学性能、超声波检测、微观形貌进行了测试。

(1) 在混凝土中掺入适量玻化微珠能够有效提高材料隔热能力、拌和物工作性, 降低表观密度, 抗压强度也有所下降, 受热温度高于 800℃, 试块出现不同程度破损、剥落、掉皮, 两类混凝土受热后强度损失率相近, 经 800℃ 处理后 NC 强度损失为 72.3%, GHB/NC 强度损失为 74.6%, 经 1 000℃ 处理后基本失去承载能力。

(2) 采用相对波速和损伤度评判混凝土高温后性能劣化, 随受热温度升高, 相对波速降低、损伤度逐步增大, 抗压强度损失率随之递增, 回归公式拟合度较高, 说明采用相对波速和损伤度评估凝

土高温劣化程度合理可行。

(3) 对水泥浆体、玻化微珠-水泥石界面过渡区经不同高温后劣化过程进行微观分析, 随温度升高, 内部水泥胶凝由整体逐渐分散、疏松, 玻化微珠、粗骨料与水泥石界面粘结力不断减弱、丧失, 粗骨料受热软化膨胀, 造成内部空隙及表面裂纹增多, 宏观强度损失, 但玻化微珠经 1 000℃ 高温后结构未受到明显破坏, 是极好的耐高温材料。

参考文献:

[1] 郭兴忠, 杨闯, 张超, 等. 节能门窗热工性能对建筑能耗影响的模拟研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(2): 261-265, 297.
GUO Xingzhong, YANG Chuang, ZHANG Chao, et al. Simulation on thermal performance of energy-saving windows and doors and its influence on building energy consumption [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(2): 261-265, 297 (in Chinese).

- [2] HONG Tianzhen. A close look at the China design standard for energy efficiency of public buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2009, 41(4): 426-435.
- [3] FAN Shujing, WANG Peiming. Effect of fly ash on drying shrinkage of thermal insulation mortar with glazed hollow beads[J]. *Journal of Wuhan University of Technology(Materials Science Edition)*, 2017, 32(6): 1352-1360.
- [4] SADINENI S B, MADALA S, BOEHM R F. Passive building energy savings: A review of building envelope components[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(8): 3617-3631.
- [5] 龚建清, 孙凯强. 不同水胶比对玻化微珠保温砂浆性能的影响[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(1): 143-149.
- GONG Jianqing, SUN Kaiqiang. Effect of different water to binder ratio on performance of vitrified microsphere insulation mortar[J]. *Journal of Hu'nan University(Nature Science)*, 2017, 44(1): 143-149 (in Chinese).
- [6] 朱江, 李国忠. 聚丙烯纤维玻化微珠复合保温材料的性能[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(4): 658-662, 703.
- ZHU Jiang, LI Guozhong. Performance of thermal insulation materials of polypropylene fiber reinforced vitrified[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(4): 658-662, 703 (in Chinese).
- [7] 吴文杰, 余以明. 基于单因素分析玻化微珠保温砂浆的配合比研究[J]. *材料导报*, 2014, 28(24): 385-390.
- WU Wenjie, YU Yiming. Study on proportioning of vitrified beads insulation mortar based on single factor analysis[J]. *Materials Review*, 2014, 28(24): 385-390 (in Chinese).
- [8] MA Gang, ZHANG Yu, LI Zhu. Influencing factors on the interface microhardness of lightweight aggregate concrete consisting of glazed hollow bead[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 2015: 1-13.
- [9] ZHAO Lin, WANG Wenjing, LI Zhu, et al. An Experimental study to evaluate the effects of adding glazed hollow beads on the mechanical properties and thermal conductivity of concrete[J]. *Materials Research Innovations*, 2015, 19(S5): 929-935.
- [10] ZHANG Yu, MA Gang, WANG Zhangfeng, et al. Shear behavior of reinforced glazed hollow bead insulation concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 174: 81-95.
- [11] 代学灵, 赵华玮, 李珠, 等. 玻化微珠在自保温墙体中的应用研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(S1): 172-176, 183.
- DAI Xueling, ZHAO Huawei, LI Zhu, et al. Research for application of glazed hollow beads in self-insulation wall[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(S1): 172-176, 183 (in Chinese).
- [12] 龚建清, 邓国旗, 单波. 活性粉末混凝土高温后超声研究及微观分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(1): 68-76.
- GONG Jianqing, DENG Guoqi, SHAN Bo. Ultrasonic test and microscopic analysis of reactive powder concrete exposed to high temperature[J]. *Journal of Hu'nan University(Natural Science)*, 2018, 45(1): 68-76 (in Chinese).
- [13] HEAP M J, LAVALLEE Y, LAUMANN A, et al. The influence of thermal-stress (up to 1 000°C) on the physical, mechanical, and chemical properties of siliceous-aggregate, high-strength concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 42: 248-265.
- [14] SHAIKH F U A., TAWHEEL M. Compressive strength and failure behaviour of fibre concrete at elevated temperatures[J]. *Advances in Concrete Construction*, 2015, 3(4): 283-293.
- [15] XIONG Houren, XU Jinming, LIU Yuanzhen, et al. Experimental study on hygrothermal deformation of external thermal insulation cladding systems with glazed hollow bead[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 2016: 1-14.
- [16] 庞建勇, 姚韦靖. 深井煤矿高温巷道新型隔热材料试验研究[J]. *矿业研究与开发*, 2016, 36(2): 76-80.
- PANG Jianyong, YAO Weijing. Experimental research on a new thermal insulating material for high-temperature roadway in deep coal mine[J]. *Mining Research and Development*, 2016, 36(2): 76-80 (in Chinese).
- [17] 赵东拂, 刘梅. 高强混凝土高温后剩余强度及无损检测试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(S2): 365-372.
- ZHAO Dongfu, LIU Mei. Experiment study on residual strength and nondestructive testing of high strength concrete after high temperature[J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(S2): 365-372 (in Chinese).
- [18] 朋改非, 杨娟, 石云兴. 超高性能混凝土高温后残余力学性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(4): 73-79.
- PENG Gaifei, YANG Juan, SHI Yunxing. Experimental study on residual mechanical properties of ultra-high performance concrete exposed to high temperature[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(4): 73-79 (in Chinese).
- [19] PENG Gaifei, HUANG Zhishan. Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(4): 593-599.
- [20] 蒋玉川, 霍达, 滕海文, 等. 页岩陶粒混凝土高温性能特征研究[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(5): 888-893.
- JIANG Yuchuan, HUO Da, TENG Haiwen, et al. Study on performance of shale ceramsite concrete after exposure to high temperature[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(5): 888-893 (in Chinese).
- [21] GONG Jianqing, DENG Guoqi, SHAN Bo. Performance evaluation of RPC exposed to high temperature combining ultrasonic test: A case study[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 157: 194-202.
- [22] 燕兰, 邢永明. 纳米SiO₂对碳纤维/混凝土高温后力学性能及微观结构的影响[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(3): 133-141.
- YAN Lan, XING Yongming. Influence of nano-SiO₂ on mechanical properties and microstructure of steel fiber reinforced concrete after heating at high temperatures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(3): 133-141 (in Chinese).
- [23] 金祖权, 孙伟, 侯保荣, 等. 混凝土的高温变形与微观结构演化[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(3): 619-623.
- JIN Zuquan, SUN Wei, HOU Baorong, et al. Deformation and microstructure evolution of concrete subjected to elevated temperature[J]. *Journal of Southeast University(Nature Science Edition)*, 2010, 40(3): 619-623 (in Chinese).