

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220404003

# 基于NSGM(1,N)模型的RTSF/PVA矿渣混凝土 高温后力学性能分析及预测\*

陈东林<sup>1,2</sup>, 王学志<sup>1</sup>, 王晨晨<sup>1</sup>, 贺晶晶<sup>3</sup>

(1. 辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州 121001; 2. 中建深圳装饰有限公司, 广东 深圳 518000; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 为改善混凝土高温后的力学性能,以RTSF和PVA体积掺量以及矿渣替代率为变量,设置四因素三水平的正交试验,测试RTSF/PVA矿渣混凝土在200℃、400℃、600℃以及800℃后的残余抗压强度;结合电镜扫描分析高温后RTSF/PVA矿渣混凝土的微观结构;并采用一种新结构的多变量灰色模型对RTSF-PVA/矿渣混凝土进行高温后的强度预测。结果表明:RTSF-PVA/矿渣混凝土对裂缝的把控能力明显优于素混凝土,600~800℃后的最大裂缝宽度仅为素混凝土的1/3~1/4,但裂纹分布较广;RTSF-PVA/矿渣混凝土的残余抗压强度随温度升高,总体上呈降低趋势,当掺量组合为RTSF掺量0.6%、PVA掺量0.05%以及GBFS替代率25%时,800℃后的抗压强度残余率为56.64%,较素混凝土提高了14.44%;通过电镜扫描观测到RTSF-PVA/矿渣混凝土基体结构更加致密,混凝土劣化主要是因为胶凝物质的分解和骨料膨胀,导致ITZ出现缺陷,以及纤维与基体粘结力降低,两者共同作用导致强度降低;建立NSGM(1,4)模型对RTSF-PVA/矿渣混凝土进行高温后的强度预测,平均相对误差控制在6.3%以内,模型精度达到Ⅱ级,根据发展系数判断模型可以对RTSF-PVA/矿渣混凝土进行高温后强度的长期预测。

**关键词:** 回收轮胎纤维(RTSF); 聚乙烯醇纤维(PVA); 高温损伤; 微观结构; 灰色预测模型

**中图分类号:** TU528.572 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1346-12

## Analysis and Prediction of Mechanical Properties of RTSF/PVA Slag Concrete after High Temperature Based on NSGM (1, N) Model

CHEN Donglin<sup>1,2</sup>, WANG Xuezhi<sup>1</sup>, WANG Chenchen<sup>1</sup>, HE Jingjing<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China;

2. China Construction Shenzhen Decoration Co., LTD., Shenzhen 518000, China;

3. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** To improve the mechanical properties of concrete at high temperatures, orthogonal tests with four factors and three levels were set to investigate the residual compressive strength of RTSF/PVA slag concrete at the temperatures of 200℃, 400℃, 600℃ and 800℃, with the volume fraction of RTSF and PVA and slag replacement rate as variables. At the same time, the microstructure of

\* 收稿日期:2022-04-04;修回日期:2022-06-13

基金项目:辽宁省教育厅基金项目(JJL201915402)、中国电建集团西北勘测设计研究院工程实验监测院项目(SYY-KJ-2020-02)资助

作者简介:陈东林(1996—),男,硕士研究生。主要从事纤维混凝土结构分析研究。E-mail:aaacan1218@163.com

通讯作者:王学志(1976—),男,教授,博士。主要从事纤维混凝土及工业固废再利用研究。E-mail:myemailwzx@163.com

RTSF/PVA slag concrete after high temperature exposure was analyzed using a scanning electron microscope. A new structure multivariable grey model is used to predict the strength of RTSF-PVA/slag concrete at high temperatures. The results show that RTSF-PVA/slag concrete has better crack control ability than plain concrete, and the maximum crack width at temperatures ranging from 600 °C to 800 °C is only 1/3~1/4 of that found in plain concrete, but the crack distribution is wider. The residual compressive strength of RTSF-PVA/slag concrete decreases as the temperature increases. When the mixture of RTSF 0.6%, PVA 0.05% and GBFS 25%, the residual compressive strength of RTSF-PVA/slag concrete is 56.64% after 800 °C exposure, which is 14.44% higher than plain concrete. Scanning electron microscope revealed that the matrix structure of RTSF-PVA/slag concrete is denser. The concrete deterioration is mainly due to the decomposition of cementitious substances and aggregate expansion, resulting in defects in ITZ, and the reduction of the adhesion between fiber and matrix, resulting in the reduction of strength. The NSGM (1, 4) model was established to predict the strength of RTSF-PVA/slag concrete after high temperature exposure. The average relative error was controlled within 6.3%, and the accuracy of the model reached level II. The long-term strength prediction of RTSF-PVA/slag concrete after high temperature could be carried out according to the development coefficient judgment model.

**Keywords:** RTSF; PVA; high temperature damage; microstructure; grey forecasting model

## 0 引 言

混凝土在高温作用下会表现出外表皮的爆裂、剥落和强度的降低,同时失去保护层的钢筋迅速软化,致使整个结构失去承载能力,导致安全事故发生<sup>[1-2]</sup>。研究表明,纤维可以有效改善混凝土高温爆裂和剥落现象,其中效果较好的是聚丙烯纤维和钢纤维。张聪等<sup>[3]</sup>分别用钢纤维和聚丙烯纤维进行了高温下混凝土内部蒸汽压力的试验。聚丙烯纤维在170 °C开始融化,形成的孔径释放了蒸汽应力;钢纤维与混凝土之间存在界面过渡区,通过过渡区可以释放蒸汽应力,对于蒸汽应力的降低效果来说,聚丙烯纤维要优于钢纤维。钢纤维属于高弹性模量纤维,对裂缝的控制能力要强于聚丙烯纤维,钢纤维良好的导热性还可以降低混凝土内部的温度应力,从而改善爆裂和剥落现象<sup>[4]</sup>。

另外,矿物掺合料有助于改善混凝土高温后的残余强度。张志刚等<sup>[5]</sup>的研究表明了大掺量粉煤灰混凝土在亚高温环境下抗压强度随温度升高逐渐增强,并且粉煤灰对提高混凝土的延展性有一定的积极作用。R.Manjunath等<sup>[6]</sup>以粒化高炉矿渣为掺合料拌入混凝土中,通过电镜扫描发现,高温下胶凝物质进行脱钙反应,水化硅酸钙和硅铝酸钙等凝

胶在不断分解,但矿渣混凝土强度损失率始终低于普通混凝土的损失率。张雪松等<sup>[7]</sup>和徐支松等<sup>[8]</sup>发现400~600 °C为强度显著变化的拐点。X射线衍射结果显示:400 °C之前混凝土中的Ca(OH)<sub>2</sub>大部分分解,600 °C之后矿渣混凝土中的水化硅酸钙、硅铝酸钙和碳酸钙开始分解,ITZ界面趋于松散化,强度显著下降。由此可以看出:与水泥的水化产物相比,矿物掺合料的水化产物至少能耐600~800 °C的高温,是极具潜力的耐高温胶凝材料。

基于以上研究,本文以粒化高炉矿渣粉为掺合料,将其按比例替代水泥熟料制备矿渣混凝土。与此同时,因为我国每年对混凝土的需求量巨大,如果能将废旧轮胎中的钢纤维(RTSF)提取出来制备纤维混凝土,形成工业化生产,废旧轮胎堆积问题将得到有效处理。因此,通过锦州当地的废旧轮胎处理厂,取得废旧轮胎钢纤维,将其与聚乙烯醇纤维(PVA)混掺,制备RTSF-PVA/矿渣混凝土。试验的主要内容:通过正交设计,设置四因素三水平正交试验,研究RTSF和PVA的纤维掺量以及矿渣的替代率对混凝土在200 °C、400 °C、600 °C和800 °C后的残余抗压强度的影响;结合SEM电镜扫描分析高温对混凝土微观结构的影响;运用NSGM(1, N)模型对RTSF-PVA/矿渣混凝土进行强度预测。

# 1 试验方法

## 1.1 原材料

水泥为渤海牌P.O42.5普通硅酸盐水泥,比表面积为310~330 m<sup>2</sup>/kg;粒化高炉矿渣微粉(GBFS)为巩义市龙泽净水材料有限公司生产的S95级矿渣,比表面积为429 m<sup>2</sup>/kg,胶凝材料各项指标见表1。

聚乙烯醇纤维(PVA)采用上海锴源化工科技有限公司生产的9 mm短切纤维,废弃轮胎钢纤维取自锦州市废旧轮胎处理厂,纤维的主要性能参数见表2,材料如图1所示。减水剂采用湖南中岩建材科技有限公司的聚羧酸高性能减水剂(减水率大于25%)。

表1 普通硅酸盐水泥及矿渣的主要成分及性能  
Table 1 Chemical composition and property of ordinary Portland cement and slag

胶凝材料	成分和性能/wt%						烧失量
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	
水泥	66.30	19.60	6.50	3.50	2.50	0.70	3.00
矿渣	34.00	34.50	17.70	1.03	1.64	6.01	1.24

表2 RTSF和PVA纤维的主要性能参数  
Table 2 Main performance parameters of RTSF and PVA fibers

纤维	RTSF	PVA
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	7 800	1.29
拉伸强度/MPa	2 125~2 533	1 830
直径/um	210~240	15.09
长度/mm	2.6~19.7	9

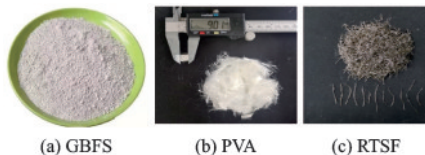


图1 GBFS、PVA纤维和RTSF纤维的外观

Fig.1 Photographs of the GBFS, PVA fiber, and RTSF fiber

## 1.2 试验设计

依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》<sup>[9]</sup>,立方体抗压强度试块尺寸采用100×100×100 mm。将制作成型的混凝土试块脱模,经历28 d标

准养护,移至干燥通风的环境静置7 d,使试件表面水分蒸发,防止试件内水分过多产生强烈的高温爆裂现象。高温试验采用正交设计的九组配合比以及一组对照试验,每组配合比设置200℃、400℃、600℃和800℃四个温度梯度,基准组混凝土配合比见表3;正交试验设计见表4。

高温试验采用箱式电阻炉进行,温速为10℃/min,试块在炉内均匀受热1 h后,待其自然冷却至常温后测试试件的残余抗压强度。混凝土立方体抗压强度试验依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[10]</sup>进行。试验采用YAW-5000J型压剪试验机测试,加载速率为0.5 MPa/s。

表3 C50基准混凝土配合比  
Table 3 Proportions of C50 reference concrete

类别	单位:kg/m <sup>3</sup>				
	水泥	砂	石子	水	减水剂
C-0	488	616	1 096	200	2.93

注:C为对照组

表4 正交试验因素水平  
Table 4 Factor level table for orthogonal test

水平	因素			
	V <sub>r</sub> /vol%	V <sub>p</sub> /vol%	R <sub>s</sub> /wt%	空白列
1	0.3	0.050	15	1
2	0.6	0.075	25	2
3	0.9	0.100	35	3

注:V<sub>r</sub>为RTSF的体积掺量,V<sub>p</sub>为PVA的体积掺量,R<sub>s</sub>为矿渣对水泥的质量替代率

# 2 抗压强度试验结果与分析

## 2.1 高温后试件的形态变化

将试块从马弗炉中取出,待其冷却至常温后,观察到同一组试块在经历五个温度梯度后外观颜色变化明显。常温下,试块呈浅灰色;200~400℃时,有少量白烟从炉中冒出,将试块取出冷却至常温后,呈青灰色;600℃时,大量白烟溢出,冷却后的试块呈现灰褐色;800℃时,炉内不再有白烟溢出,冷却后的试块呈现黄褐色,试块表面的孔洞较多,出现掉渣和轻微掉角现象。

从抗压试验的破坏形态可以看出:随着温度的升高,试件的表皮由外而内的剥落程度加剧,骨料与硬化后的浆体相互剥离,基体内部趋于松散化;使得试件的完整性降低,表现为脆性破坏;掺入

RTSF和PVA纤维后,纤维的散乱分布所形成的非定向支撑使试件的剥落程度降低,并且随纤维掺量的增加,试件的完整性逐渐升高,破坏形态表现为延性破坏。试件破坏形态如图2所示。

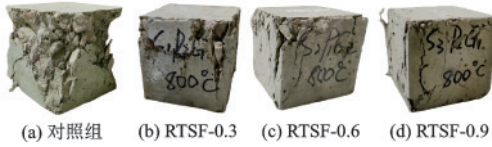


图2 不同纤维掺量下混凝土试块抗压破坏形态

Fig.2 Compressive failure modes of concrete test blocks with different fiber contents

通过裂缝宽度测试仪可以直观地观察到不同温度后试件的裂缝分布情况并且能够对裂缝宽度进行测量,如图3所示。从图3可以看出:200℃时,四组试件表面均未观察到裂缝;400℃时,四组试件

表面开始出现裂缝,因为高温使得试块内部水分蒸发,浆体收缩而骨料膨胀,使得试件开裂。通过比较发现:RTSF-PVA/矿渣混凝土的裂缝比素混凝土的裂缝更细,随着RTSF纤维掺量和矿渣替代率的增加,其对裂缝的分布及宽度控制的更加突出,且(b)(c)(d)三组试块均掺入0.05%的PVA,当其高温融化后形成的空洞会给基体提供缓冲空间,减缓裂缝扩张;600℃时,试块表面的裂缝演变成裂缝,当纤维掺量和矿渣替代率增加时,裂缝的宽度呈递减趋势,此时,素混凝土的裂缝宽度约为FC-7的三倍左右;当温度达到800℃时,试件表面已经出现肉眼可见的大裂缝,通过裂缝宽度测试仪测出素混凝土的最大裂缝宽度已经达到0.25mm左右,阻裂能力表现较好的FC-7裂缝宽度在0.05mm左右,但周围分布着多条方向不一的小裂纹。不同温度后最大裂缝宽度见表5。

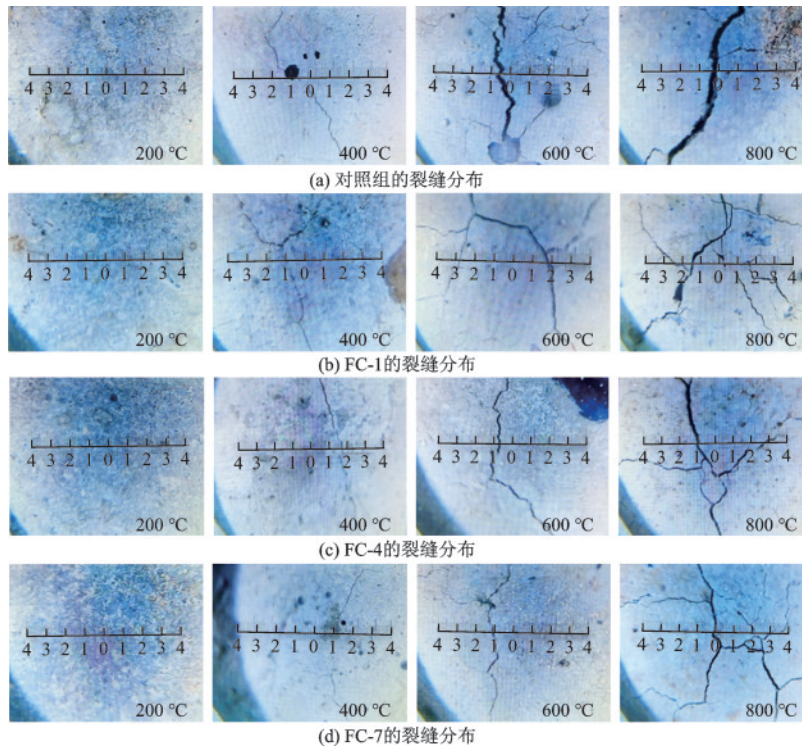


图3 不同温度下混凝土的裂缝分布情况

Fig.3 Crack distribution in concrete at different temperatures

表5 混凝土最大裂缝宽度

Table 5 Maximum crack widths of concrete

温度/℃	最大裂缝宽度/mm			
	C-0	FC-1	FC-4	FC-7
200	-	-	-	-
400	0.05	0.05	0.05	(0,0.05)
600	0.15	0.1	(0.05,0.1)	0.05
800	0.25	0.15	0.15	(0.05,0.1)

通过裂缝宽度测试仪呈现的试件裂缝分布情况可以看出:随着温度的升高,试件的裂缝数量越多和裂缝宽度越大;而RTSF-PVA/矿渣混凝土对裂缝的把控能力明显优于素混凝土,充分体现了纤维的阻裂能力,然而矿渣和纤维的加入,基体的结构更加致密,在失水和骨料膨胀的作用下,裂纹的分布会更广。

## 2.2 试验结果与分析

试件高温后的残余抗压强度结果见表6。从表中可以看出:温度从常温升高到200℃时,十组试块的立方体抗压强度稍有降低,其中强度降幅较多的是FC-6和FC-9,分别降低了7.75 MPa和7.6 MPa;当温度上升到400℃时,试块强度有一定的加强,其中涨幅最明显的是FC-9,提升了6.4 MPa;当温度达到600℃时,所有试块强度开始大幅度降低,降幅最大的是FC-7,降低了20.08 MPa;当温度升高到800℃时,对照组的残余抗压强度降为23.24 MPa,试验组的最优残余抗压强度为36.72 MPa。从纤维掺量来看,大纤维掺量的试块高温后的抗压强度残余率总体上低于小掺量试块的残余率,说明大纤维掺量在高温后未表现出高性能;并且FC-3和FC-6这两组试块在200℃、400℃和600℃三个梯度上的残余率都低于对照组,表明其掺入混凝土中不经济。

从十条走势线中可以看出,FC-2和FC-4在经历200℃、400℃、600℃和800℃的煅烧后,其残余率相对较高,800℃后的抗压强度分别保持常温时强度的56.64%和55.46%,性能表现较好。出现这种现象的原因一方面是因为:大纤维掺量在拌和混凝土过程中容易出现团聚现象,拌入混凝土中会给基体内部带来缺陷,尤其是团聚的PVA纤维在195℃融化后,会在基体内部留下较大孔洞,受力时会在孔洞处出现应力集中现象,影响试块强度;另一方面,600℃之后,附着在废弃钢纤维周围的胶凝物质大量分解,并且高温使得RTSF纤维出现氧化脱碳现象,导致纤维表面出现层状物剥落现象,降低了纤维与基体之间的机械咬合力以及废弃钢纤维的拉伸强度<sup>[11]</sup>。当基体中废弃钢纤维比重较大时,会相对降低主要起承载作用的骨料的含量<sup>[12]</sup>,而纤维在受力过程中却丧失性能,所以会导致大纤维掺量试验组的抗压强度弱于低掺量试验组的抗压强度。

表6 不同温度梯度后的RTSF-PVA/矿渣混凝土立方体抗压强度

Table 6 Compressive strength of RTSF-PVA/slag concrete cubes subjected to different temperature gradients

试件类型	Vr/vol%	Vp/vol%	Rs/wt%	不同温度梯度后的立方体抗压强度/MPa				
				20℃	200℃	400℃	600℃	800℃
C-0	0	0	0	55.07	52.78	53.19	39.15	23.24
FC-1	0.3	0.05	15	63.63	62.42	63.85	44.23	30.11
FC-2	0.3	0.075	25	60.60	60.10	62.74	46.09	33.61
FC-3	0.3	0.1	35	57.10	51.96	53.26	38.12	26.32
FC-4	0.6	0.05	25	64.83	65.11	68.13	55.09	36.72
FC-5	0.6	0.075	35	62.58	61.55	59.23	46.44	33.10
FC-6	0.6	0.1	15	67.04	59.29	57.97	43.96	29.94
FC-7	0.9	0.05	35	65.09	57.54	63.61	40.53	28.87
FC-8	0.9	0.075	15	68.13	65.51	66.41	50.14	30.87
FC-9	0.9	0.1	25	64.30	56.70	63.10	45.42	31.11

高温后的抗压强度与常温下抗压强度的比值为抗压强度的残余率。图4为不同温度后各组试件的残余率趋势。从图中可以看出:200℃时,试块的抗压强度稍有降低,因为在这一阶段中试块内部存在未完全蒸发的自由水和未完全参与水化反应的结合水<sup>[13]</sup>,在高温煅烧过程中,这些水分蒸发,在基体内部聚集大量水蒸气,由于纤维和矿物掺合料的掺入,使得基体内部结构致密,水蒸气难以溢出,便形成一定的蒸汽压,使基体内部受力而产生缺陷,导致强度稍有降低<sup>[14]</sup>;当温度上升到400℃时,试块的强度稍有提升,从趋势图看出提升幅度最大的是FC-9。在这一阶段,一方面,由于PVA的熔点为195℃,此时基体内散乱分布的PVA纤维已经完全

融化,在基体内部留下大量微小孔径,为基体内部的水蒸气建立了蒸发路径,释放了蒸汽应力,减少了对基体内部的损害<sup>[15]</sup>;另一方面,从200℃到400℃,这一阶段经历了“高温固化”过程,高温推动基体内未水化完全的胶凝材料继续水解,生成水化硅酸钙和硅铝酸钙等凝胶加强了ITZ界面区<sup>[16-17]</sup>,并且这些胶凝物质可以弥补PVA融化后产生的孔径,达到细化基体内部结构的目的,所以这一阶段的抗压强度稍有提升。在400℃到600℃阶段,基体内的C-S-H、C-A-S-H和水滑石等胶凝物质在高温下大量分解<sup>[7]</sup>,使IZT界面区(骨料-水泥界面过渡区)遭到破坏,骨料之间的粘结力以及基体与纤维之间的粘结力降低<sup>[18]</sup>,导致试块的整体性与黏结性

下降,所以,从趋势图中显现出,在这一阶段的强度残余率急剧降低。当温度到达800℃时,基体中大部分C-S-H凝胶、C-A-S-H和水滑石分解,大量镁黄长石和钙黄长石生成,物相结构由非晶体状变为晶体<sup>[19]</sup>,此时附着在纤维表面的大量胶凝物质受高温分解,基本丧失桥接骨料以及限制裂缝发展的作用,通过受压后的破坏形态便可以看出,800℃后的破坏形态趋于松散化,说明纤维基本丧失桥接作用,此时试块的强度进一步下降。

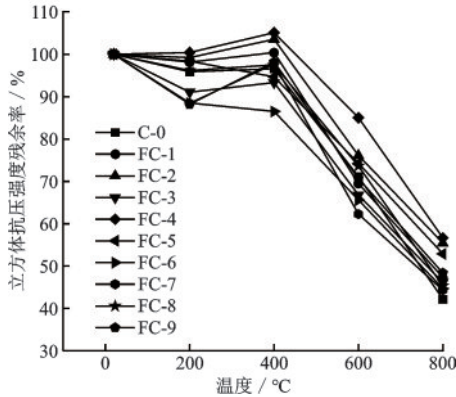


图4 立方体抗压强度残余率趋势

Fig.4 Trend diagram of residual strength of cubes

通过SEM电镜扫描的结果证实了上述机理分析的可靠性。从图5的扫描结果可以得出:素混凝土基体中分布着大量针状和棒状AFT(钙矾石)、片状的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以及 $\text{CH}$ (六方板状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ),并且这些生成物相互交错生长,导致基体内部结构不够紧密,呈现出大量微小孔洞;而掺有25%粒化高炉矿渣微粉的矿渣混凝土基体内部生成大量颗粒状的凝胶体,紧密排列,覆盖于矿渣颗粒和骨料表面,使得内部结构更加致密。在200℃和400℃下,RTSF纤维表面紧密包裹着大量颗粒状和薄膜状胶凝物质,且纤维与基体的过渡区联系紧密,基体内部存在少量蒸汽应力引起的微小裂纹和孔洞;当温度达到600℃后,基体内部结构开始劣化,附着在RTSF纤维表面的胶凝物质开始分解,且纤维与基体的过渡区出现裂缝。在高温使骨料膨胀和胶凝物质的分解双重作用下,浆体与骨料界面区(ITZ)出现缺陷,产生较大裂缝。800℃时的劣化程度更加明显,RTSF纤维表面的胶凝物质基本分解完全,基体与纤维之间产生间隙,骨料完全暴露出来,且基体内部的缺陷更加明显,大裂缝布满基体四周,内部结构变得疏松多孔。

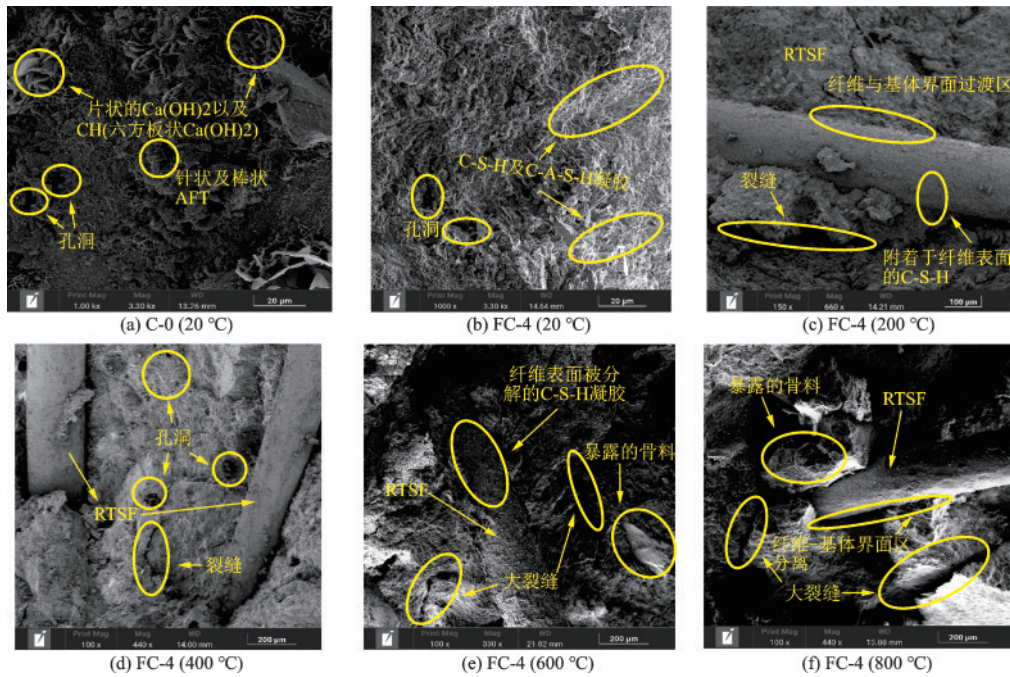


图5 不同温度下试件的微观结构变化

Fig.5 Microstructure changes of specimens at different temperatures

表7计算出各个温度梯度下RTSF、PVA和GBFS三个因素对混凝土高温后抗压强度的极差值,根据极差值的大小确定三个因素对高温后抗压强度的影响程度。表中空白组极差值都小于各自

温度梯度下因素的极差值,说明组内差异小于组间差异,也就表明:试验误差对试验结果的影响小于因素水平变化对实验结果的影响,证明了因素选择的可靠性。

表7 混凝土各个温度后抗压强度极差强度结果分析

Table 7 Analysis of range strength results of compressive strength of concrete at various temperatures

温度/℃	试验因素	k1j	k2j	k3j	Rj
200	A(RTSF)	58.16	61.98	59.92	3.82
	B(PVA)	61.69	62.39	55.98	6.40
	C(GBFS)	62.41	60.64	57.02	5.39
	Blank	60.22	58.98	60.86	1.88
400	A(RTSF)	59.95	61.78	64.04	4.09
	B(PVA)	64.86	62.79	58.11	6.75
	C(GBFS)	62.74	64.66	58.37	6.29
	Blank	62.06	61.11	62.60	1.49
600	A(RTSF)	42.81	48.50	45.36	5.68
	B(PVA)	46.62	47.56	42.50	5.06
	C(GBFS)	46.11	48.87	41.70	7.17
	Blank	45.36	43.53	47.78	4.26
800	A(RTSF)	30.01	32.05	30.28	2.03
	B(PVA)	31.90	32.53	29.12	3.40
	C(GBFS)	30.31	33.81	29.43	4.38
	Blank	31.44	30.81	31.30	0.63

通过表7中极差值的大小可以确定200℃时,三因素对抗压强度影响的大小为:PVA>GBFS>RTSF。根据图6(a)的趋势图可以得出在200℃下各个因素的最佳掺量水平为:RTSF掺量0.6%、PVA掺量0.075%以及GBFS替代率15%。200℃时,纤维掺量处于中间水平的性能表现较好,说明此时的掺量能够更好地分散在基体中且发挥增韧作用;而GBFS的替代率在15%时表现最好,可解释为GBFS的比表面积在430 m<sup>2</sup>/kg左右,而水泥的比表面积在350 m<sup>2</sup>/kg左右,前者的粒径小于后者的粒径,掺量过高时,一部分GBFS水化生成胶凝物质,一部分作为微集料细化孔洞;由于高温产生的蒸汽压损伤内部结构,所以GBFS水平变化对抗压强度影响较大。

当温度在400℃时,根据极差值的大小,得出三因素对抗压强度影响的顺序为:PVA>GBFS>RTSF。根据图6(b)的趋势图可以看出在400℃时三因素的最佳掺量水平为:RTSF掺量0.9%、PVA掺量0.05%以及GBFS替代率25%。可解释为200℃到400℃的高温可以激发GBFS进行二次水化,生成的胶凝物质填补PVA融化后留下的孔径的同时能够包裹更多的RTSF纤维,若GBFS的替代率过高,即使有高温推动水化反应,但是随着反应的进行,液相中的OH<sup>-</sup>不断消耗,环境中的碱度将不足以支撑GBFS进行水化反应,所以此时GBFS

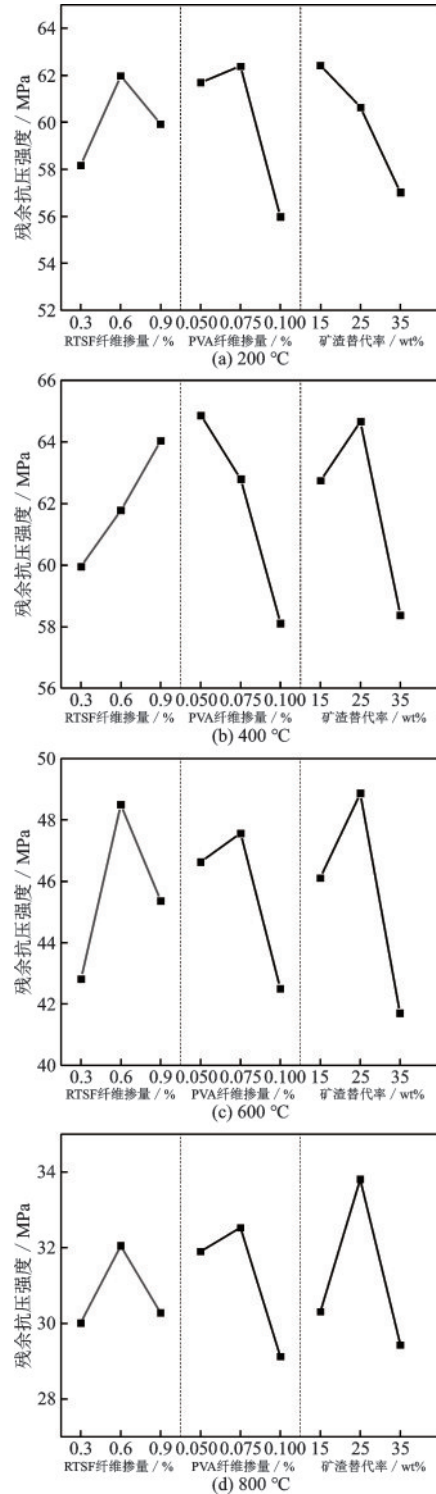


图6 不同水平下的残余抗压强度趋势

Fig.6 Residual compressive strength trend at different levels

的替代率在25%时较好。

当温度达到600℃时,由极差值得出三因素对抗压强度的影响顺序为:GBFS>RTSF>PVA。800℃时,因素对抗压强度的影响顺序为:GBFS>PVA>RTSF。根据图6(c)、(d)的趋势图可以看出在600℃和800℃时,三因素的最佳掺量水平为:RTSF

掺量 0.6%、PVA 掺量 0.075% 以及 GBFS 替代率 25%。试块在经历 600 °C 至 800 °C 的温度后,RTSF 失去阻裂能力,所以对抗压强度的贡献较小;而高温既促进 GBFS 水化又迫使其产物分解,对温度的敏感度较高,导致其水平变化对抗压强度的影响较大。

### 3 NSGM(1,N)高温强度预测模型

#### 3.1 NSGM(1,N)模型

国内外学者根据邓聚龙<sup>[20]</sup>和刘思峰等<sup>[21]</sup>创立的灰色系统理论,对混凝土力学性能和耐久性能进行强度建模,都取得了较好的拟合效果。李佳等<sup>[22]</sup>运用 GM(1,6) 模型对风积沙自密实混凝土强度进行预测,优化后的灰色模型平均误差在 4%~6% 左右,精度较高。张鹏等<sup>[23]</sup>运用 GM(1,2) 模型、模糊分类理论和马尔科夫理论对填充体强度进行组合模型预测,预测精度高于单一模型和曲线回归模型。高矗等<sup>[24]</sup>运用 GM(1,1) 模型对应力损伤轻骨料混凝土抗冻性进行评估,并且与修正 Loland 模型进行比较,发现 GM(1,1) 模型比修正 Loland 模型更适用于混凝土抗冻性的评估。但是曾波<sup>[25]</sup>发现现有的 GM(1,N) 模型存在机理缺陷、参数缺陷以及结构缺陷,为了弥补三大缺陷,他提出了一种新结构的多变量灰色预测模型,对传统灰色预测模型进行了参数优化,从而提高预测的精度。所以,本试验将采用这种新结构的多变量灰色模型—NSGM(1,N) 模型进行残余强度预测。

将对 RTSF/PVA 矿渣混凝土在常温以及经历 200 °C、400 °C、600 °C 和 800 °C 高温后的残余抗压强

$$Y = \begin{bmatrix} x_1^0(2) \\ x_1^0(3) \\ \vdots \\ x_1^0(m) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} x_2^{(1)}(2) & x_3^{(1)}(2) & \cdots & x_n^{(1)}(2) & -z_1^{(1)}(2) & 1 & 1 \\ x_2^{(1)}(3) & x_3^{(1)}(3) & \cdots & x_n^{(1)}(3) & -z_1^{(1)}(3) & 2 & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_2^{(1)}(m) & x_3^{(1)}(m) & \cdots & x_n^{(1)}(m) & -z_1^{(1)}(m) & m-1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

将参数  $\hat{p} = [b_2, b_3, \dots, b_n, a, h_1, h_2]^T$  代入 NSGM(1, N) 模型中,得到 NSGM(1, N) 模型的时间响应式:

$$\hat{x}_1^{(1)}(k) = \sum_{t=1}^{k-1} \left[ \mu_1 \sum_{i=2}^n \mu_2^{i-1} b_i x_i^{(1)}(k-t+1) \right] + \mu_2^{k-1} \hat{x}_1^{(1)}(1) + \sum_{j=0}^{k-2} \mu_2^j [(k-j)\mu_3 + \mu_4] \quad (9)$$

对  $\hat{x}_1^{(1)}(k)$  进行累减还原,得到  $\hat{x}_1^{(0)}(k)$  时间响应式:

$$\hat{x}_1^{(0)}(k) = \mu_1(\mu_2 - 1) \sum_{t=1}^{k-2} \left[ \sum_{i=2}^n \mu_2^{t-1} b_i x_i^{(1)}(k-t) \right] + \mu_1 \sum_{i=2}^n b_i x_i^{(1)}(k) + \sum_{j=0}^{k-3} \mu_2^j \mu_3 + (\mu_2 - 1) \mu_2^{k-2} \hat{x}_1^{(1)}(1) + \mu_2^{k-2} (2\mu_3 + \mu_4) \quad (10)$$

式中,  $\mu_1 = \frac{1}{1+0.5a}$ ;  $\mu_2 = \frac{1-0.5a}{1+0.5a}$ ;  $\mu_3 = \frac{h_1}{1+0.5a}$ ;  $\mu_4 = \frac{h_2 - h_1}{1+0.5a}$ 。

度作为系统特征数据序列,将 RTSF 纤维掺量、PVA 纤维掺量以及矿渣替代率作为相关因素数据序列,建立 NSGM(1,4) 模型。

设系统特征数据序列为:

$$X_1^{(0)} = (x_{11}^{(0)}, x_{12}^{(0)}, x_{13}^{(0)}, \dots, x_{1n}^{(0)}), n = 1, 2, \dots, 9 \quad (1)$$

设相关因素数据序列为:

$$X_2^{(0)} = (x_{21}^{(0)}, x_{22}^{(0)}, x_{23}^{(0)}, \dots, x_{2n}^{(0)}), n = 1, 2, \dots, 9 \quad (2)$$

$$X_3^{(0)} = (x_{31}^{(0)}, x_{32}^{(0)}, x_{33}^{(0)}, \dots, x_{3n}^{(0)}), n = 1, 2, \dots, 9 \quad (3)$$

$$X_4^{(0)} = (x_{41}^{(0)}, x_{42}^{(0)}, x_{43}^{(0)}, \dots, x_{4n}^{(0)}), n = 1, 2, \dots, 9 \quad (4)$$

计算  $X_1^{(0)} \sim X_4^{(0)}$  的 1-AGO 累加生成序列  $X_i^{(1)}$ :

$$X_i^{(1)} = [x_i^{(1)}(1), x_i^{(1)}(2), \dots, x_i^{(1)}(n)] \quad (5)$$

式中,  $x_i^{(1)}(k) = \sum_{p=1}^k x_i^{(0)}(p), k = 1, 2, \dots, n$ 。

计算系统特征序列  $X_i^{(1)}$  的紧邻均值等权生成序列  $Z_i^{(1)}$ :

$$Z_i^{(1)} = [z_i^{(1)}(2), z_i^{(1)}(3), \dots, z_i^{(1)}(n)] \quad (6)$$

式中,  $z_i^{(1)}(k) = \frac{1}{2} (x_i^{(1)}(k) + x_i^{(1)}(k+1))$ 。

定义等式  $x_1^{(0)}(k) + a z_1^{(1)}(k) = \sum_{i=2}^n b_i x_i^{(1)}(k) + h_1(k-1) + h_2$  为具有一阶差分方程和多个变量的新结构 NSGM(1, N) 模型,  $\hat{x}_1^{(0)}(k) = \sum_{i=2}^n b_i x_i^{(1)}(k) - a z_1^{(1)}(k) + h_1(k-1) + h_2$  为 NSGM(1, N) 的差分方程,采用最小二乘估计对方程中的参数向量  $\hat{p} = [b_2, b_3, \dots, b_n, a, h_1, h_2]^T$  进行估计:

$$\hat{p} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (7)$$

### 3.2 建立 NSGM(1,4)高温强度预测模型

将系统特征数据序列和相关因素数据序列

$X_1^{(0)} \sim X_4^{(0)}$ 进行一次累加处理,得到1-AGO序列,处理结果见表8。根据公式(6)~(8)计算得到不同温度下矿渣混凝土残余抗压强度的预测模型(表9)。

表8 经一次累加处理的1-AGO序列

Table 8 Processing 1-AGO sequence in a single accumulation

序列	一次累加处理( $X_i^{(1)}$ )								
系统特征序列	63.63	124.23	181.33	246.16	308.74	375.78	440.87	509.00	573.30
	62.42	122.52	174.48	239.59	301.14	360.43	417.97	483.48	540.18
	63.85	126.59	179.85	247.98	307.21	365.18	428.79	495.20	558.30
	44.23	90.32	128.44	183.53	229.97	273.93	314.46	364.60	410.02
	30.11	63.72	90.04	126.76	159.86	189.8	218.67	249.54	280.65
相关行为序列	0.30	0.60	0.90	1.50	2.10	2.70	3.60	4.50	5.40
	0.05	0.13	0.23	0.28	0.35	0.45	0.50	0.58	0.68
	0.15	0.40	0.75	1.00	1.35	1.50	1.85	2.00	2.25

表9 RTSF/PVA 矿渣混凝土抗压强度预测模型

Table 9 RTSF/PVA prediction model for compressive strength of slag concrete

温度/°C	残余抗压强度预测模型	
20	$\hat{X}_1^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^{k-1} \left[ 1.0311 \sum_{i=2}^N 1.062 \cdot 3^{t-1} b_i X_i^{(1)}(k-t+1) \right] + 1.062 \cdot 3^{k-1} \hat{X}_1^{(1)}(1) + \sum_{j=0}^{k-2} 1.062 \cdot 3^j [33.3573(k-j) + 40.1490]$	
200	$\hat{X}_1^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^{k-1} \left[ 0.9533 \sum_{i=2}^N 0.906 \cdot 6^{t-1} b_i X_i^{(1)}(k-t+1) \right] + 0.906 \cdot 6^{k-1} \hat{X}_1^{(1)}(1) + \sum_{j=0}^{k-2} 0.906 \cdot 6^j [55.9666(k-j) + 28.3508]$	
400	$\hat{X}_1^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^{k-1} \left[ 0.8651 \sum_{i=2}^N 0.730 \cdot 2^{t-1} b_i X_i^{(1)}(k-t+1) \right] + 0.730 \cdot 2^{k-1} \hat{X}_1^{(1)}(1) + \sum_{j=0}^{k-2} 0.730 \cdot 2^j [48.2608(k-j) + 34.2124]$	
600	$\hat{X}_1^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^{k-1} \left[ 0.9871 \sum_{i=2}^N 0.974 \cdot 1^{t-1} b_i X_i^{(1)}(k-t+1) \right] + 0.974 \cdot 1^{k-1} \hat{X}_1^{(1)}(1) + \sum_{j=0}^{k-2} 0.974 \cdot 1^j [52.9679(k-j) + 19.6578]$	
800	$\hat{X}_1^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^{k-1} \left[ 1.0218 \sum_{i=2}^N 1.043 \cdot 6^{t-1} b_i X_i^{(1)}(k-t+1) \right] + 1.043 \cdot 6^{k-1} \hat{X}_1^{(1)}(1) + \sum_{j=0}^{k-2} 1.043 \cdot 6^j [21.9859(k-j) + 24.693]$	

注: $k=1,2,3,\dots$

### 3.3 模型精度检验

通过图7的曲线走势可以看出:各个温度下的NSGM(1,4)模拟曲线与原始曲线的走势基本相近,且相对误差的曲线走势平稳,平均相对误差控制在6.3%以下,说明模拟的精度较好,模型的可信度较高。趋势图可以对模型的精度进行大致的判断,而通过对比误差检验标准可以对模型的精度进行进一步检验,评估模型的精度等级。

模型参数见表10。从表中可以看出, $a$ 值在-0.0604至0.3119之间,处于区间(-2,2),且 $a \geq -0.3$ 。

精度判别标准见表11。表中的 $a$ 为发展系数, $a$ 的大小及正负反映了序列的发展态势,邓聚龙<sup>[20]</sup>推导出只有在 $a \in (-2,2)$ 时,模型建立才具有意义;刘

表10 NSGM(1,4)模型参数及精度检验

Table 10 NSGM (1,4) model parameters and accuracy test

温度/°C	$a$	平均相对误差/%
20	-0.0604	0.6034
200	0.0980	2.0786
400	0.3119	2.5161
600	0.0262	6.1258
800	-0.0427	6.2419

表11 灰色模型精度判断标准

Table 11 Judgment criteria for accuracy of the grey model

检验指标	精度等级			
	I级/长期	II级/短期	III级/慎用	IV级/不适用
相对误差/%	0.01	0.05	0.1	0.2
$a$	$\geq -0.3$	$\geq -0.5$	$\geq -0.8$	$< -1$

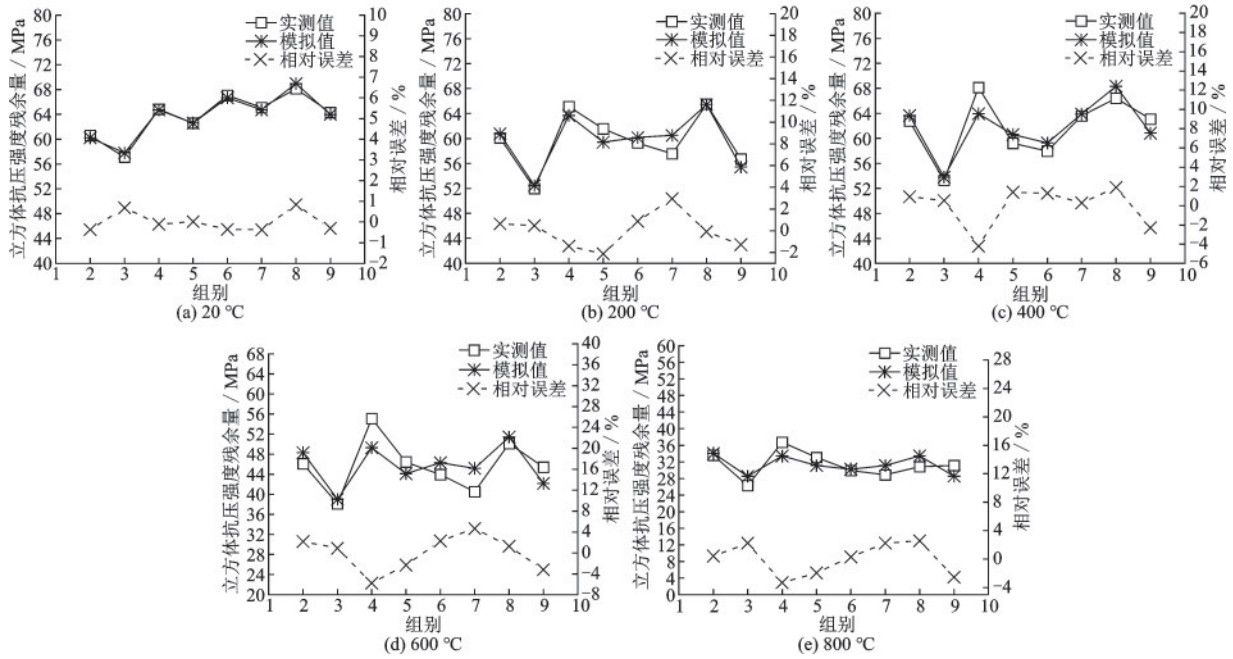


图7 NSGM(1,4)趋势与原始趋势对比

Fig.7 Comparison between NSGM (1,4) trend and the original trend

思峰等<sup>[21]</sup>对预测模型的期限及发展系数 $a$ 的范围进行研究,得出:当 $a \geq -0.3$ 时,可以进行长期预测;当 $-0.3 > a \geq -0.5$ 时,可以进行短期预测;当 $-0.5 > a \geq -0.8$ 时,短期预测要慎用;当 $-0.8 > a \geq -1$ 时,需要对模型进行残差修正;当 $a < -1$ 时,不适用于灰色模型预测。所以高温损伤模型可以用于长期预测;且平均相对误差控制在6.3%以内,模型精度在Ⅱ级左右,所以不需要对其进行残差修正,表明模型可以适用于RTSF/PVA矿渣混凝土高温损伤的长期预测。

## 4 结论

(1)随着温度的升高,混凝土的裂缝数量增多和裂缝宽度增大,RTSF-PVA/矿渣混凝土对裂缝的把控能力明显优于素混凝土。600~800℃时,RTSF-PVA/矿渣混凝土的最大裂缝宽度仅为素混凝土的1/3~1/4;但RTSF-PVA/矿渣混凝土结构致密,高温使得其裂纹分布比素混凝土的裂纹分布更广。

(2)随着温度的升高,RTSF-PVA/矿渣混凝土的抗压强度总体上呈降低的趋势。200℃的抗压强度稍有降低,通过极差分析确定三因素对抗压强度影响的大小为:PVA>GBFS>RTSF;最优掺量组合为:RTSF掺量0.6%、PVA掺量0.075%以及

GBFS替代率15%。400℃时的抗压强度有所回升,三因素对抗压强度影响的大小为:PVA>GBFS>RTSF;最优掺量组合为:RTSF掺量0.9%、PVA掺量0.05%以及GBFS替代率25%。600℃时的抗压强度开始大幅降低,三因素对抗压强度影响的大小为:GBFS>RTSF>PVA。800℃时的最优抗压强度残余率为56.64%,较素混凝土提高了14.44%,三因素对抗压强度影响的大小为:GBFS>PVA>RTSF;600℃和800℃的最优掺量组合为:RTSF掺量0.6%、PVA掺量0.075%以及GBFS替代率25%。

(3)通过SEM电镜扫描在不同温度下基体的微观结构得出:矿渣能够增强混凝土基体的密实度,加强了浆体与骨料界面区,同时提升了纤维与基体的粘结力,更加充分的发挥纤维的增韧阻裂作用;另一方面,高温使得混凝土劣化,主要是因为胶凝物质的分解和骨料膨胀,导致ITZ出现缺陷,以及纤维与基体粘结力降低,丧失对裂缝的控制能力,共同作用导致强度降低。

(4)本文采用一种新结构的多变量灰色模型-NSGM(1, N)模型实现了对不同温度后的RTSF-PVA/矿渣混凝土进行高温强度损伤预测,五组模型的平均相对误差控制在6.3%以内,模型精度在Ⅱ级左右;通过发展系数 $a$ 判定NSGM(1,4)模型可以对RTSF-PVA/矿渣混凝土进行高温损伤

的长期预测。

## 参考文献:

- [1] Xiao J Z, Xie Q H, Hou Y Z, et al. Reliability analysis of high-strength concrete columns during a fire[J]. Key Engineering Materials, 2015, 629-630:273-278.
- [2] Dwaikat M B, Kodur V K R. Fire induced spalling in high strength concrete beams [J]. Fire Technology, 2010, 46(1): 251-274.
- [3] 张聪, 夏超凡, 袁振, 等. 火灾下纤维自密实混凝土的爆裂行为预测[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2):260-267,282.  
Zhang C, Xia C F, Yuan Z, et al. Spalling behaviour prediction for fiber reinforced self-consolidating concrete under fire[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2):260-267,282. (in Chinese)
- [4] 朋改非, 段旭杰, 黄广华. 钢纤维对高性能混凝土高温爆裂行为的抑制作用[C]//“全国特种混凝土技术及工程应用”学术交流暨2008年混凝土质量专业委员会年会论文集. 西安:中国建筑科学研究院,2008, 6: 575-580.  
Peng G F, Duan X J, Huang G H. Effect of steel fiber on cracking Behavior of high performance concrete at high temperature [C] //Proceedings of the "National Special Concrete Technology and Engineering Application" Academic Exchange Conference and the annual Conference of Concrete Quality Committee 2008. Xian: China Academy of Building Research, 2008, 6: 575-580. (in Chinese)
- [5] 张志刚, 赵林, 张沛, 等. 亚高温下不同粉煤灰掺量高延性混凝土的力学性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(5):831-836.  
Zhang Z G, Zhao L, Zhang P, et al. Mechanical properties of engineered cementitious composites with different fly ash contents at sub-elevated temperature [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(5):831-836. (in Chinese)
- [6] Manjunath R, Narasimhan M C, Umesha K M. Studies on high performance alkali activated slag concrete mixes subjected to aggressive environments and sustained elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2019, 229:116887.1-116887.19.
- [7] 张雪松, 吴相豪, 李志卫, 等. 高温对矿渣混凝土抗压强度与微观结构的影响[J]. 建筑科学, 2019, 35(7): 72-76.  
Zhang X S, Wu X H, Li Z W, et al. Effect of high temperature on compressive strength and microstructure of slag concrete [J]. Building Science, 2019, 35(7): 72-76. (in Chinese)
- [8] 徐支松, 袁广林, 李庆涛. 高掺量矿渣混凝土高温后性能劣化研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(6): 119-123,160.  
Xu Z S, Yuan G L, Li Q T. Performance degradation of high volume blast furnace slag concrete after elevated temperatures[J]. Industrial Construction, 2016, 46(6): 119-123,160. (in Chinese)
- [9] 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T50081—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [10] 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [11] 朱晶, 郑文忠, 谢礼立, 等. 不同纤维增强碱矿渣胶凝材料高温后力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(5):109-114.  
Zhu J, Zheng W Z, Xie L L, et al. Experimental research on mechanical properties of different fibers reinforced alkali-activated slag cementitious material after high temperature[J]. Industrial Construction, 2019, 49(5):109-114. (in Chinese)
- [12] Dilbas H, Imek M, akr. An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume[J]. Construction and Building Materials, 2014, 61:50-59.
- [13] Xie J, Zhang Z, Lu Z. Coupling effects of silica fume and steel-fiber on the compressive behaviour of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperature [J]. Construction and Building Materials, 2018, 184:752-764.
- [14] Lv L S, Lan W W, Deng Z H, et al. Residual compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete after exposure to high temperatures[J]. Structural Concrete: Journal of the FIB, 2017, 18(3):479-486
- [15] 邓明科, 成媛, 翁世强, 等. 高温后高延性混凝土的抗压性能及微观结构[J]. 复合材料学报, 2020, 37(4): 985-996.  
Deng M K, Cheng Y, Weng S Q, et al. Compressive properties and micro-structure of high ductility concrete exposed to elevated temperature [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(4): 985-996. (in Chinese)
- [16] 朋改非, 牛旭婧, 成铠. 超高性能混凝土的火灾高温性能研究综述[J]. 材料导报, 2017, 31(23):17-23.  
Peng G F, Niu X J, Cheng K. Research on fire resistance of ultra-high-performance concrete: a review [J].

- Materials Reports, 2017, 31(23):17-23. (in Chinese)
- [17] Dias W P S, Khoury G A, Sullivan P J E. Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700 °C (1292F) [J]. Materials Journal, 1990, 87(2):160-166.
- [18] Niaki M H, Fereidoon A, Ahangari M G. Experimental study on the mechanical and thermal properties of basalt fiber and nanoclay reinforced polymer concrete [J]. Composite Structures, 2018, 191:231-238.
- [19] 高帅, 陈逸明, 林培桐, 等. 高温对碱激发超高性能混凝土力学性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(9): 2815-2820.
- Gao S, Chen Y M, Lin P T, et al. Effect of high temperature on mechanical properties of alkali-activated ultra-high performance concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(9): 2815-2820. (in Chinese)
- [20] 邓聚龙. 灰色预测与决策 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1988:22-32.
- Deng J L. Gray prediction and decision-making [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1988:22-32. (in Chinese)
- [21] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰. 灰色系统理论及其应用. 7 版 [M]. 北京: 科学出版社, 2014:140-159.
- Liu S F, Yang Y J, Wu L F. The theory of gray systems and its applications [M]. Beijing: Science Press, 2014:140-159. (in Chinese)
- [22] 李佳, 刘清, 邓培元, 等. 基于灰色理论掺风积沙自密实混凝土强度分析与预测 [J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(3):361-376.
- Li J, Liu Q, Deng B Y, et al. Strength analysis and prediction of self-compacting concrete based on grey theory [J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(3): 361-376. (in Chinese)
- [23] 张鹏, 高谦, 温震江, 等. 充填体强度影响因素及组合预测模型 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(2):232-241.
- Zhang P, Gao Q, Wen Z J, et al. Influencing factors on backfill strength and a combined strength prediction model [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(2):232-241. (in Chinese)
- [24] 高鑫, 孔祥振, 申向东. 基于 GM(1, 1) 的应力损伤轻骨料混凝土抗冻性评估 [J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4):184-190.
- Gao C, Kong X Z, Shen X D. Freeze-thaw resistance evaluation of light weight aggregate concrete with stress damage based on GM(1, 1) [J]. Advanced Engineering Science, 2021, 53(4):184-190. (in Chinese)
- [25] 曾波. 灰色预测理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2020:89-100.
- Zeng B. Grey prediction theory and its applications [M]. Beijing: Science Press, 2020:89-100. (in Chinese)
- (本文编辑: 池营营)



(上接第 1330 页)

- [42] 皮淑萍. 新型砌体填充墙框架结构抗震性能的试验研究和理论分析 [D]. 苏州: 苏州科技学院, 2012.
- Pi S P. Experimental study and theoretical analysis on seismic behavior of new masonry infill wall frame structure [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [43] 孔璟常. 开洞砌体填充墙 RC 框架结构抗震性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- Kong J C. Seismic performance of masonry infilled RC frame structures with openings [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [44] 程俊涛. 开洞填充墙框架结构抗震性能的试验研究和理论分析 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2012.
- Cheng J T. Experimental study and analysis of the infilled frame with openings [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [45] 建筑抗震韧性评价标准: GB/T 38591—2020 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [46] 张明远. 基于构件性能的填充墙框架结构地震易损性研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2017.
- Zhang M Y. Components performance-based seismic vulnerability analysis of masonry infilled frame structures [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2017. (in Chinese)
- [47] Chiozzi A, Miranda E. Fragility functions for masonry infill walls with in-plane loading [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46(15): 2831-2850.