

基于X-CT的高温后再生保温混凝土损伤分析

苗艳春 张玉 SELYUTINA Nina SMIRNOV Ivan 邓克招 李贝贝 都思哲 刘元珍 马钢

Damage analysis of meso-scale recycled aggregate thermal insulation concrete based on X-CT after high temperature

MAO Yanchun, ZHANG Yu, SELYUTINA Nina, SMIRNOV Ivan, DENG Kezhao, LI Beibei, DU Sizhe, LIU Yuanzhen, MA Gang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210716.007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于CT图像的再生混凝土细观破坏裂纹分形特征

Fractal characteristics of meso-failure crack in recycled coarse aggregate concrete based on CT image

复合材料学报. 2020, 37(7): 1774–1784 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190917.002>

纤维增强树脂复合材料约束超高性能混凝土轴压性能的细观数值模拟

Meso-scale numerical simulation of axial compression performance of fiber reinforced polymer composite-confined ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1629–1638 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190827.001>

玻化微珠保温混凝土高温后性能劣化及微观结构

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

复合材料学报. 2019, 36(12): 2932–2941 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190118.001>

基于数字图像相关方法的气凝胶复合材料各向异性热变形测量

Anisotropic thermal deformation measurement of aerogel composites based on digital image correlation method

复合材料学报. 2017, 34(9): 2020–2029 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170103.001>

高温与脱粘对复合材料蜂窝板模态特性影响的试验

Experimental investigation on the effects of the high temperature and debonding on the modal characteristics of the composite honeycomb structure

复合材料学报. 2018, 35(4): 885–895 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170628.002>

高温后高延性混凝土的抗压性能及微观结构

Compressive properties and micro-structure of high ductility concrete exposed to elevated temperature

复合材料学报. 2020, 37(4): 985–996 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190731.001>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210716.007

基于 X-CT 的高温后再生保温混凝土损伤分析



分享本文

苗艳春¹, 张玉^{*1,2}, SELYUTINA Nina³, SMIRNOV Ivan³, 邓克招¹,
李贝贝¹, 都思哲¹, 刘元珍¹, 马钢¹

(1. 太原理工大学 土木工程学院, 太原 030024; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640;
3. 圣彼得堡国立大学, 圣彼得堡 199034)

摘要: 火灾的发生往往会导致混凝土材料微观结构的损伤劣化, 体现在水化物分解、孔隙结构粗化、热开裂和水汽压力升高诱致开裂等, 继而导致材料宏观力学性能及耐久性的下降。轻质高强、内部多孔、高热稳定的玻化微珠 (GHB) 的细观调控功能可实现混凝土耐高温性能的提升。为了研究受高温作用的再生保温混凝土 (RATIC) 内部细观结构及裂纹变化特征, 本研究首先对高温作用后的 RATIC 开展了立方体抗压强度试验和 CT 扫描试验, 之后利用基于改进的自适应阈值法和区域生长法的图像分割算法, 建立了基于真实结构的 RATIC 细观模型, 分析了不同 GHB 及再生骨料 (RCA) 掺量的 RATIC 试件随温度变化时其内部微裂纹的孕育、萌生、发展及贯通过程。并对 RATIC 破坏形态与 CT 结果进行了对比分析。研究表明: GHB 对裂缝的延伸有显著阻断作用, 为蒸汽压提供了释放通道, 缓解了砂浆区域、孔隙边界处的开裂, 减缓了热量的传播, 提升了混凝土抗热致损伤性能。

关键词: 再生保温混凝土; 高温; CT; 图像分割; 细观模型

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)06-2829-15

Damage analysis of meso-scale recycled aggregate thermal insulation
concrete based on X-CT after high temperature

MIAO Yanchun¹, ZHANG Yu^{*1,2}, SELYUTINA Nina³, SMIRNOV Ivan³, DENG Kezhao¹,
LI Beibei¹, DU Sizhe¹, LIU Yuanzhen¹, MA Gang¹

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
3. Saint Petersburg State University, St. Petersburg 199034, Russia)

Abstract: The occurrence of fire often leads to the damage and deterioration of the micro-meso-structure of concrete materials, which is reflected in the decomposition of hydrates, the coarsening of pore structure, thermal cracking, and the cracking induced by the increase of water vapor pressure, which in turn lead to the decline of the macroscopic mechanical properties and durability of materials. The meso-regulatory function of the lightweight, high-strength, internally porous, and highly thermally stable glazed hollow beads (GHB) can improve the high-temperature resistance of concrete. In order to study the characteristics of the internal meso-scale structure and crack evolution of recycled aggregate thermal insulation concrete (RATIC) subjected to high temperature, the cube compressive strength test and CT test were firstly carried out on RATIC after high temperature. Then the RATIC meso-scale model was established based on the real structure by the improved image segmentation algorithm based on the adaptive threshold method and the regional growth method (IISA). The process of initiation, development and coalescence of internal microcracks in RATIC with different GHB and recycled coarse aggregate (RCA) contents with tem-

收稿日期: 2021-05-25; 修回日期: 2021-07-06; 录用日期: 2021-07-07; 网络首发时间: 2021-07-19 09:07:25
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210716.007>
基金项目: 国家自然科学基金 (51808375); Russian Foundation for Basic Research(21-51-53008); 国家自然科学基金国际合作与交流项目 (5201101735); 亚热带建筑科学重点实验室基金 (2019ZB23)
通信作者: 张玉, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为混凝土结构材料及建筑节能材料 E-mail: zhangyu03@tyut.edu.cn
引用格式: 苗艳春, 张玉, SELYUTINA Nina, 等. 基于 X-CT 的高温后再生保温混凝土损伤分析[J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 2829-2843.
MIAO Yanchun, ZHANG Yu, SELYUTINA Nina, et al. Damage analysis of meso-scale recycled aggregate thermal insulation concrete based on X-CT after high temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(6): 2829-2843(in Chinese).

perature change were studied. Furthermore, the failure patterns of RATIC under simulated conditions and CT results were analyzed by contrast, which show that GHB can significantly block the extension of cracks, provide a release channel for vapor pressure, alleviate cracks in the mortar area and pore boundaries, slow down the spread of heat in the concrete. It has a positive effect on improving the heat-induced damage resistance of concrete.

Keywords: recycled aggregate thermal insulation concrete; high temperature; CT; image segmentation; meso-scale model

建筑物的大型火灾一直是当今社会最频繁、最具破坏性的灾难之一^[1]。火灾的发生会对建筑结构的各项性能产生显著影响,如混凝土微细观结构的劣化损伤,体现在水化物分解、孔隙结构粗化、水汽压力升高诱致开裂等^[2-3],进而导致内部微裂纹扩展,宏观裂纹延伸,给外界物质的侵入提供了通道,最终造成结构承载能力与耐久性下降^[4-5],并伴随着巨大的人员伤亡和经济损失。因此,必须寻求热稳定性材料,减少热量传输和热应力,从而降低火灾等极端荷载作用下的结构耐久性的退化。

近年来,随着天然骨料(NCA)的匮乏和不断增加的废旧混凝土,规模化使用再生骨料(RCA)替代NCA是实现混凝土可持续发展的重要途径。而内部多孔、表面玻化的玻化微珠(GHB)具有造孔稳定、温度稳定和强度稳定等特点,与混凝土的弹性协调良好,当其加入混凝土时可抑制热量的传播^[6],并对缓慢扩张型裂缝的延伸有显著阻断作用,避免交汇贯通形成与表面连通的孔道,从而保证混凝土高温后正常工作,延长混凝土使用寿命。且通过合理的配合比设计和力学性能试验研究,该混凝土表现出与普通混凝土相当的结构承载性能,并在耐久性能和长期性能方面表现出色^[7-9]。

现阶段,国内外学者已针对高温下混凝土的劣化性能开展了大量研究,Li等^[10]、Fu等^[11]和张科等^[12]基于数值模型探究了高温下混凝土内部热应力的变化和损伤演化过程,揭示了混凝土开裂和爆炸剥落的根本机制;Henry等^[13]、赵昕等^[14]、杜红秀等^[15]基于X-CT对混凝土进行无损检测。分析了高温对混凝土内部孔隙率^[13]和裂纹分形特征^[14]的影响,赵昕等^[14]、杜红秀等^[15]进一步探究了聚乙烯醇(PVA)和钢纤维^[14]、聚丙烯纤维^[15]、对混凝土高温劣化性能的改善机制,结果表明:随着温度的升高,混凝土内部孔隙率增大,裂纹发展更充分;Xu等^[16]、Fares等^[17]、Liu等^[18]和Liu等^[19]基于微观尺度下的SEM、XRD和压汞法,分析了高温下混凝土内部孔隙^[16-17]、微裂纹的发

展过程和界面过渡区(ITZ)的破坏机制^[18-19]及混凝土材料物理和化学性能的改变^[18]。但微观尺度的结构分析通常需把试件破碎,并不能在保证试件完整性的情况下对其高温后的根本劣化机制进行探究,而X-CT可以无损地对构件内部结构变化进行分析。

鉴于此,本研究采用CT设备采集了混凝土断面图像,利用基于改进的自适应阈值法和区域生长法的图像分割算法(IISA),得到了各细观组分的二值化分割图像,采用MATLAB自编程序获得了各细观组分边界及其真实x-y坐标信息,最终建立了基于真实结构的再生保温混凝土(RATIC)细观模型,对比分析了试验和模拟条件下不同GHB及RCA掺量的RATIC试件随温度变化时其内部微裂纹的孕育、萌生、发展及贯通过程,旨在为提升高温下混凝土的抗劣化性能提供理论基础和技术方案。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料和构件制作

制作RATIC试块所需的NCA、RCA和细骨料产自太原某砂石厂家。NCA和RCA粒径均介于5~20 mm;细骨料为中砂,细度模数为2.5;GHB产自信阳某厂家,是由玻璃熔岩矿经膨胀、玻璃化制备而成,粒径为1~3 mm,其外部形态和内部结构见图1;骨料和GHB的基本性能分别见表1和表2;水泥采用P.O42.5普通硅酸盐水泥。本试

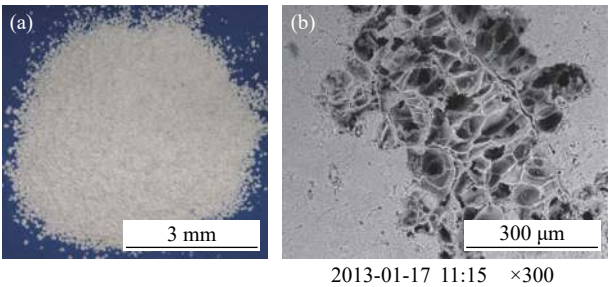


图1 玻化微珠(GHB)的外部形态(a)和内部结构(b)^[8]
Fig. 1 Appearance (a) and micro-structure (b) of glazed hollow beads (GHB)^[8]

表 1 骨料基本性能
Table 1 Properties of aggregates

Material	Density/(g·cm ⁻³)		Percentage/%				
	Bulk density	Apparent density	Water absorption at 24 h	Water content	Crushing index	Loss of mass	Sediment percentage
Sand	1.48	2.67	3.70	0.80	—	5.8	2.57
NCA	1.45	2.65	2.40	1.13	9.1	4.7	0.62
RCA	1.16	2.48	5.35	1.56	14.6	8.9	0.58

Notes: NCA—Natural coarse aggregate; RCA—Recycled coarse aggregate.

表 2 GHB 基本性能
Table 2 Material properties of GHB

Material	Bulk density/ (kg·m ⁻³)	Thermal conductivity/ (W·(m·K) ⁻¹)	Cylindrical compress strength/kPa	Percentage/%		
				Water absorption at 24 h	Volume floating rate	Surface vitrified close cell content
GHB	130	0.03	23	207	90	89

验所采用的基准配合比来源于 Wang 等^[7]通过正交试验确定的 RATIC 配合比。在基准配合比的基础上，得到了不同 RCA 体积取代率 (0%、50% 和 100%) 和不同 GHB 体积比 (0%、70% 和 100%) 的 RATIC 配合比 (如表 3 所示)，表中 R 和 G 分别表示 RCA 和 GHB，以 R100-G100 为例，其表示

RCA 体积取代率为 100% 和 GHB 体积比为 100% 的 RATIC 试件。将水泥、粗骨料、自来水、砂、GHB、高性能减水剂和硅灰按照表 3 所示的配合比混合，最后经搅拌、成型、养护得到了不同 GHB 和 RCA 掺量的 RATIC 试件，试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 和 Φ 50 mm×50 mm。

表 3 再生保温混凝土 (RATIC) 配合比
Table 3 Mixture proportions of recycled aggregate thermal insulation concrete (RATIC)

Group	Mix detail	Ratio							Cement content/ (kg·m ⁻³)
		Water/ binder	Sand/ cement	Recycled aggregate/ cement	Natural aggregate/ cement	Water reducer/ %	Silica fume/ %	Glazed hollow bead/concrete mixture mass/%	
Group 1	R100-G0	0.52	1.07	2.40	0	1.18	7.44	0	484
	R100-G70	0.52	1.07	2.40	0	1.18	7.44	4.89	484
	R100-G100	0.52	1.07	2.40	0	1.18	7.44	6.84	484
Group 2	R0-G100	0.52	1.07	0	2.50	1.18	7.44	6.72	484
	R50-G100	0.52	1.07	1.20	1.25	1.18	7.44	6.78	484
	R100-G100	0.52	1.07	2.40	0	1.18	7.44	6.84	484

Notes: R—Recycled coarse aggregate; G—Glazed hollow beads; In Rx-Gy, x—Volume substitution rate; y—Volume content.

1.2 试验方法

利用 SX2-16-10 电阻炉按照图 2 所示的升温曲线对试件进行温度加载，试件所处的初始环境温度为 20℃，升温速度为 5℃/min，到达目标温度后，恒温 4 h；在试件降温阶段，当温度高于 100℃时，控制降温速度为 5℃/min。当温度低于 100℃时，试件自然冷却至室温。待试件完全冷却后，对 RATIC 立方体和圆柱体试件分别进行立方体抗压强度试验和 CT 扫描试验，立方体抗压强度试验采用 STYE-3000C 型号电脑全自动混凝土压力试验机，其额定电压为 380 V，功率 750 W，加载速

率为 3.00 kN/s；CT 扫描试验采用 DIONDO D2 型号的微焦点工业 CT 仪，扫描参数为：电压 210 kV，电流 90 μ A，扫描速度 2 000 ms，焦点检测距离 805 mm，以 1.1 mm 为输出间隔，输出分辨率为 0.019 mm×0.019 mm 的图片。试验具体流程图见图 2。

2 试验结果与分析

2.1 基于 CT 图像的 RATIC 试件破坏形态分析
不同受火温度后 RATIC 中间层 CT 扫描图像见图 3。可知：当受火温度为 300℃ 时，仅有少数

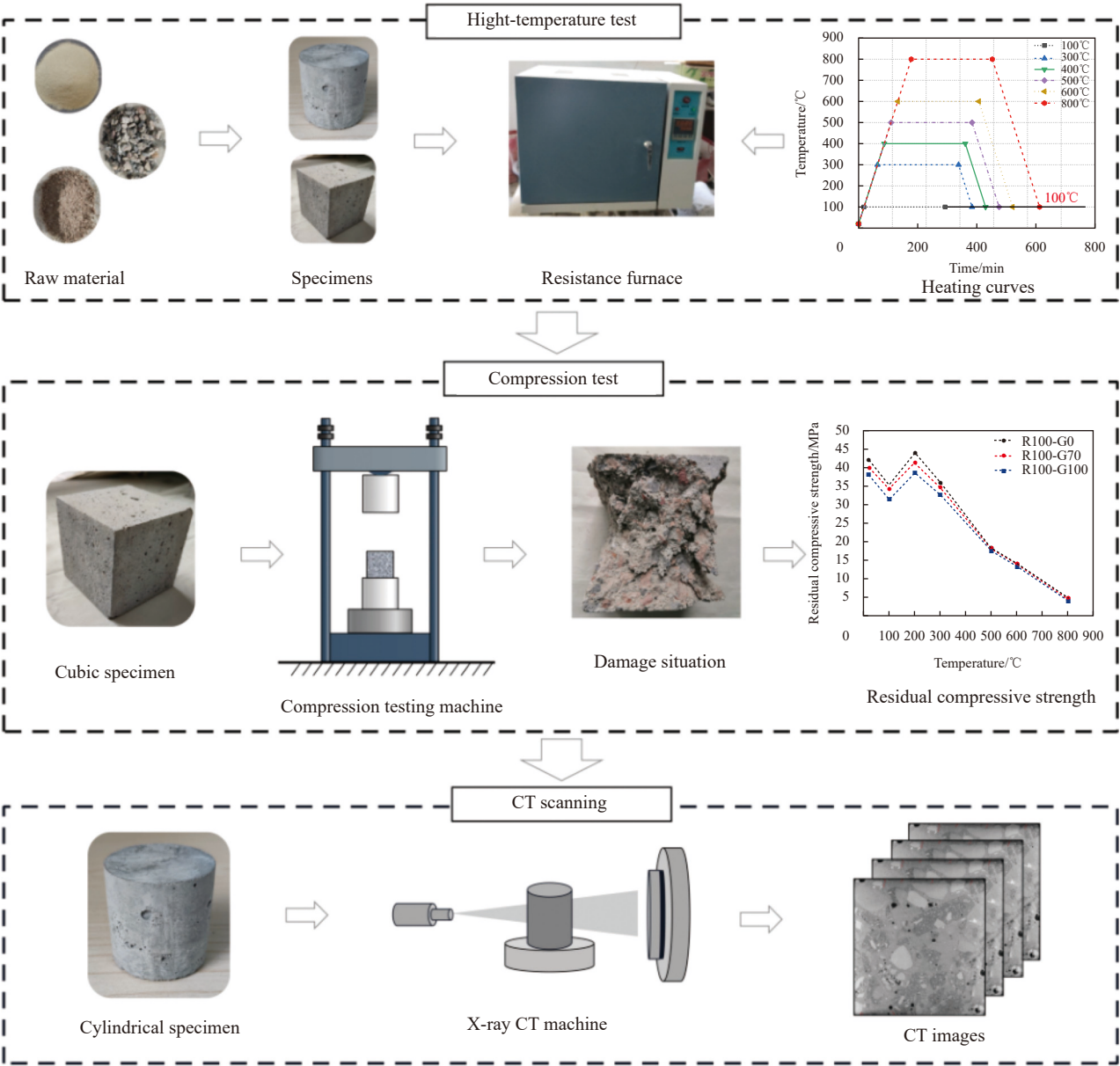


图2 试验流程图

Fig. 2 Flow chart of test

微小裂纹出现于试件的上下边缘，随着受火温度的提高，微裂缝逐渐变宽并向内拓展，主裂纹与次裂纹串接汇合。当温度为 600℃ 时，可以明显地看到宽裂纹的出现，裂纹数量明显增加，其已经遍布整个混凝土截面，且裂纹主要分布于新旧砂浆的结合处、旧砂浆基体 (O-CPM) 和 NCA 的结合处及 NCA 和新砂浆基体 (N-CPM) 的结合处等比较薄弱的区域。研究表明，这种高温下混凝土的热致开裂现象是由蒸汽压机制^[20]和热应力机制^[21]耦合作用的结果。

进一步深入观察发现含有 RCA 的混凝土开裂

情况相对较严重，裂缝相对较长，宽度也略微增加。这可能归因于 RCA 在破碎过程受到较大外力导致骨料内部出现大量细小孔隙和微裂缝等原始缺陷。这导致 RCA 与 NCA 相比，具有孔隙率高、密度轻、吸水率大等特点^[20]，使 RCA 的含水率高于 NCA。经过试验测得，RCA 和 NCA 的含水率分别为 1.56%、1.13%(如表 1 所示)。而含水率又是影响高温下混凝土爆裂性能的主要原因^[22]。在高温作用下，RCA 内部的水分受热蒸发形成水蒸气。在致密的混凝土内部，水蒸气迁移受到阻碍，导致在混凝土内部逐渐形成蒸汽压力(如图 4 所示)。

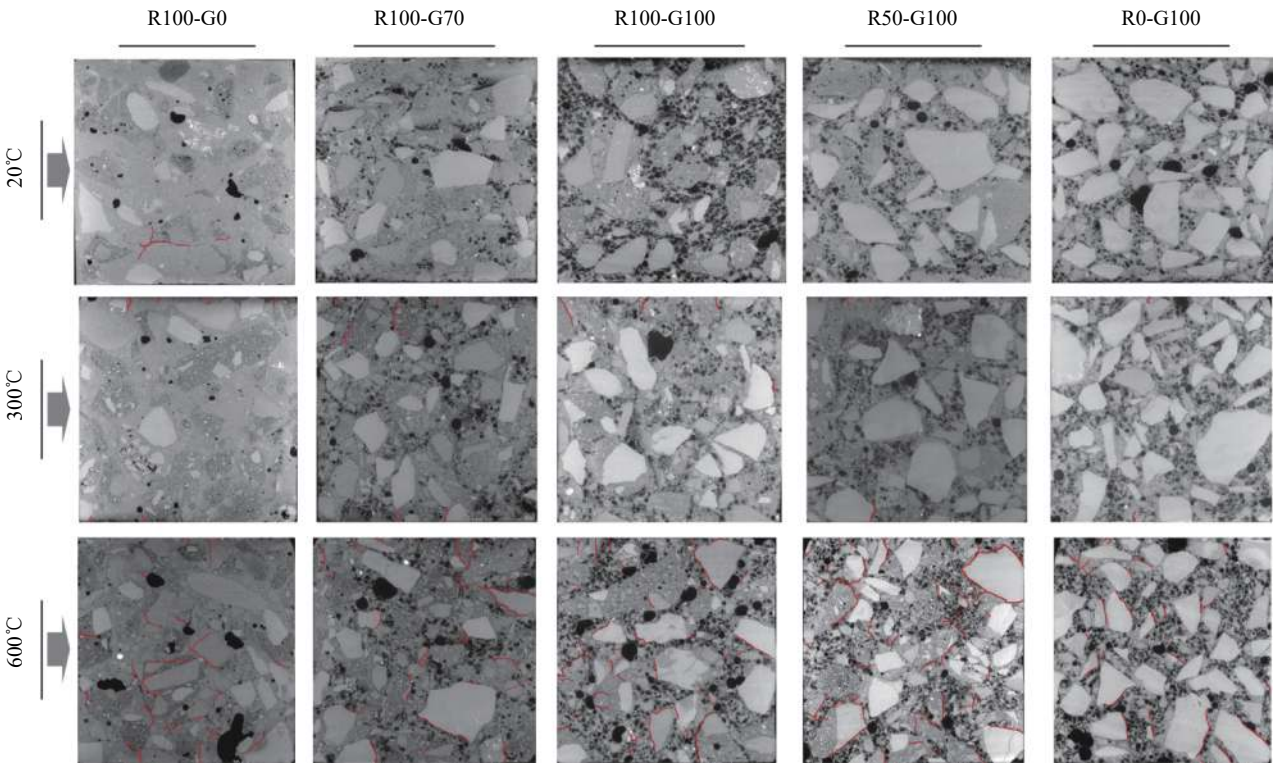


图3 不同温度下 RATIC 中截面 CT 扫描图像

Fig. 3 CT scanning images of RATIC at different temperatures

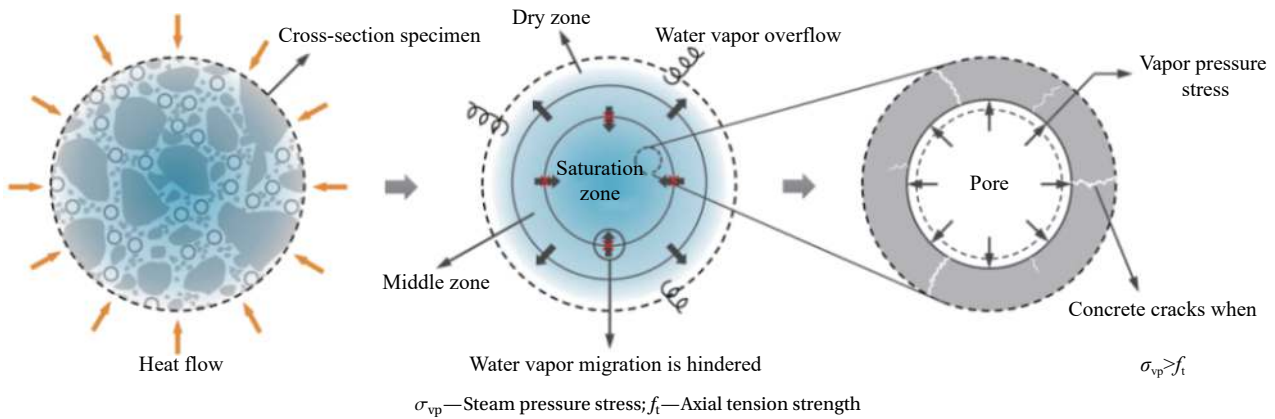


图4 蒸汽压作用机制

Fig. 4 Mechanism of vapor pressure

当蒸汽压力应力 σ_{vp} 超过混凝土的轴心抗拉强度 f_t 时，则发生开裂。

此外，对不同 GHB 含量下混凝土试件的热致开裂情况和分布特征对比分析发现。随着 GHB 掺量的增加，各混凝土试件在高温下水泥砂浆区域的开裂损伤情况明显得到缓解。对于未掺加 GHB 的混凝土试件，在 600℃ 温度后，其水泥砂浆区域开裂较为明显，各裂缝相互交织，形成网状路径，覆盖试件整个横截面，将水泥砂浆分割成若

干小的几何区域。而对于掺有 GHB 的混凝土试件，在高温下其水泥砂浆区域的开裂损伤情况明显减弱，特别在孔隙边界处，其裂纹衍生明显减少。分析其原因，这可能是由于 GHB 内部的空腔结构为高温下混凝土内部的蒸汽压应力提供了释放通道，减弱了作用在孔隙边界处的蒸汽压应力^[23]，从而缓解了再生保温混凝土砂浆区域的开裂。

由此可知，RATIC 在高温下的开裂行为是多种因素综合控制的结果，影响其高温下开裂性能的

主要因素包括以下两个方面：(1) RATIC 中 RCA 较高的含水率所引起的较大的蒸汽压应力作用导致开裂加重；(2) RATIC 中 GHB 独特的空腔结构为蒸汽压应力提供了释放通道，减弱了蒸汽压应力集中，缓解了砂浆区域、孔隙边界处的开裂。

2.2 高温对 RATIC 残余抗压强度的影响

随着温度的升高，各混凝土试件残余抗压强度均表现出明显的双阶段特征。以 300℃ 为临界温度，当作用温度低于 300℃ 时，各试件的残余抗压强度在常温抗压强度值附近上下波动；具体表现为在 100℃ 时，各试件的残余抗压强度有所下降，其可能归因于混凝土内部自由水的蒸发，试件内部孔隙率增大^[24]；200℃ 时其残余抗压强度逐渐回升，甚至高于常温状态下的抗压强度值，其主要是由于 100~200℃ 的环境温度使混凝土内部水化更加充分，此外，此环境温度使混凝土干燥硬化也是其强度有所回升的原因之一^[25]；300℃

后，各试件残余抗压强度近似直线下降，其主要是由于，水泥浆体和粗骨料之间热工参数的差异性，高温产生的蒸汽压力使两者之间的变形差增大，从而促使温度裂缝不断发展^[24]。此外，混凝土内部 Ca(OH)₂ 和水化硅酸钙的分解也是混凝土残余抗压强度剧烈下降的原因之一^[26]。但随着温度的升高，各试件之间的强度差异逐渐缩小。到 800℃ 时，所有 RATIC 试件的残余抗压强度基本一致。

此外，由图 5(a) 可知，在 20~300℃ 阶段，GHB 的存在会影响混凝土在高温下的残余抗压强度，随着温度的升高，R100-G0、R100-G70 与 R100-G100 三者残余抗压强度之间的差距不断缩小。观察图 5(b) 发现，相同温度下 R50-G100、R100-G100 残余抗压强度相较于 R0-G100 有明显降低，但是 R50-G100 与 R100-G100 残余抗压强度基本相同，说明掺入 RAC 会降低 RATIC 高温后残余抗压强度，但残余抗压强度随 RCA 掺量的进一步增加并没有产生明显的变化。

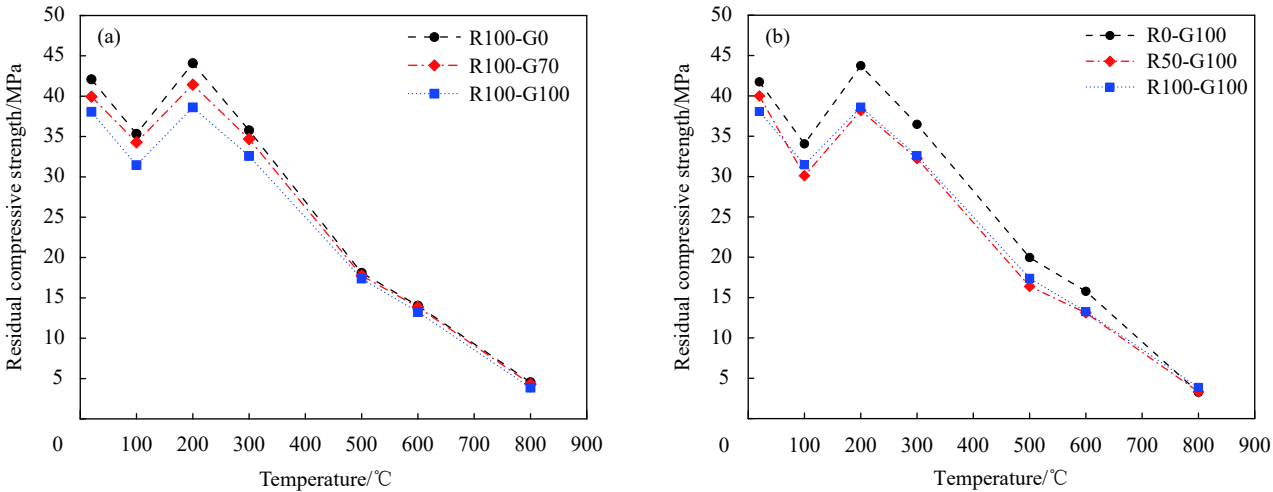


图 5 不同温度下 RATIC 试件的残余抗压强度与 GHB 含量 (a) 和 RCA 取代率 (b) 的关系

Fig. 5 Residual compressive strength of RATIC at elevated temperatures varying with GHB content (a) and RCA content (b)

2.3 高温对 RATIC 相对残余抗压强度的影响

为了进一步分析 RATIC 抵抗高温损伤的能力，对高温后各类试件的相对残余抗压强度进行计算 (如图 6 所示)。

对比图 6(a) 曲线发现，温度升高至 100℃ 时，R100-G70 相对残余抗压强度最大；温度达到 200℃ 时，R100-G70 与 R100-G0 相对残余抗压强度基本相同；温度达到 300~600℃ 阶段，R100-G70 与 R100-G100 相对残余抗压强度明显高于 R100-G0，并且在 500~600℃ 阶段，R100-G100 相对残余抗压

强度高于 R100-G70，说明在 300~600℃ 阶段掺加 GHB 可以有效的提升混凝土的抗高温性能，减缓混凝土力学性能的衰减，而混凝土抵抗高温损伤的能力随着 GHB 掺量的增大而提高。温度达到 800℃ 时，R100-G0、R100-G70 与 R100-G100 相对残余抗压强度分别为 0.11、0.11 与 0.10，这一阶段混凝土已经完全被破坏，丧失承载能力。进一步分析图 6(b) 发现，R0-G100 相对残余抗压强度始终高于 R50-G100、R100-G100，说明 RAC 的掺入会减弱 RATIC 抵抗高温损伤的能力。值得注意

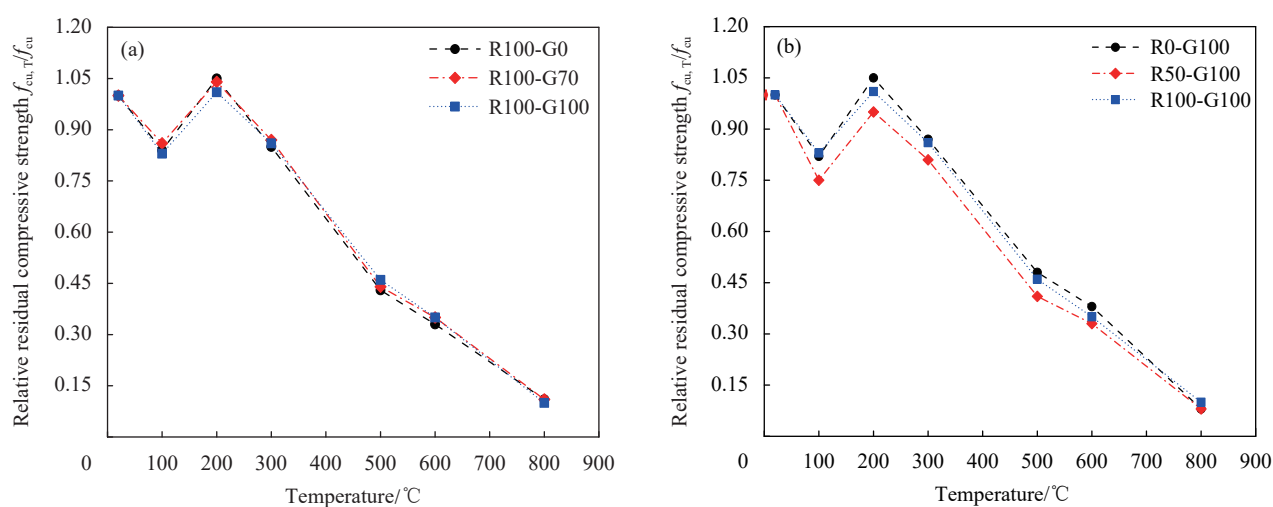


图6 不同温度下 RATIC 试件的相对残余抗压强度与 GHB 含量 (a) 和 RCA 取代率 (b) 的关系

Fig. 6 Relative residual compressive strength of RATIC at elevated temperatures varying with GHB content (a) and RCA content (b)

的是,相较于 R50-G100,不同温度下 R100-G100 与 R0-G100 两者相对残余抗压强度差距较小,温度为 600℃ 时两者差距最大,此时 R100-G100 相对残余抗压强度比 R0-G100 降低了 13.87%。可以看出随着 RCA 体积取代率的增大,RATIC 抵抗高温损伤的能力有所下降。

3 RATIC 细观模型的建立

3.1 CT 扫描图像的预处理

利用 MATLAB 软件首先对 RATIC 的 CT 图像进行降噪和平滑技术等预处理,并得到其原始灰度直方图(如图 7(a) 所示),可知,CT 扫描图像中 NCA 与 O-CPM 之间、O-CPM 与 N-CPM 之间、GHB 与孔隙之间的灰度值很接近,且当灰度值大于某一值时,像素量几乎为 0,各灰度图不能呈现明显的多峰状态。为了进一步突出 RATIC CT 扫描图

像中的感兴趣区域,使用灰度拉伸方法对 RATIC CT 扫描图像原始灰度直方图进行线性变化,有选择地拉伸某个灰度区间以改善输出图像,其关系式如下:

$$f(x,y) = \begin{cases} \frac{c}{a}f(x,y) & 0 \leq f(x,y) < a \\ \frac{d-c}{b-a}(f(x,y)-a)+c & a \leq f(x,y) < b \\ \frac{255-d}{255-b}(f(x,y)-b)+d & b \leq f(x,y) \leq 255 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(x,y)$ 为某一像素点 (x,y) 的灰度值; a 、 b 、 c 、 d 为灰度值常数,其值介于 0~255。

灰度拉伸处理后的灰度直方图见图 7(b)。可知,灰度拉伸处理后的 RATIC 的 CT 图像中的 NCA、O-CPM、N-CPM、GHB 和孔隙等组分之间的对比度明显加强,突出了所需的图像信息特征,

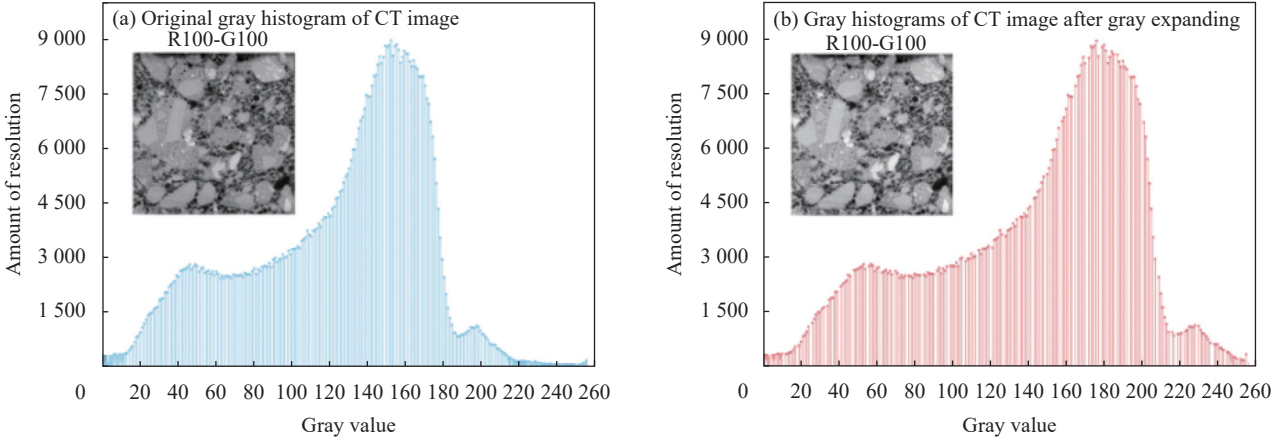


图7 灰度拉伸前后的 RATIC CT 图像灰度直方图

Fig. 7 Gray histograms of RATIC CT images before and after gray expanding

为后续图像分割处理奠定了基础。

3.2 RATIC 各细观结构的获取

为了获得 RATIC 各细观组分的二值化图像并得到准确的边界信息，需要对 CT 图像进行图像

分割处理。令 R 表示整幅 CT 图像，那么图像分割处理即就是将区域 R 划分为 n 个子区域 ($R_1, R_2, \dots, R_n$) 的过程。提出了一种改进的基于阈值法和区域生长法的图像分割方法 (IISA)(如图 8

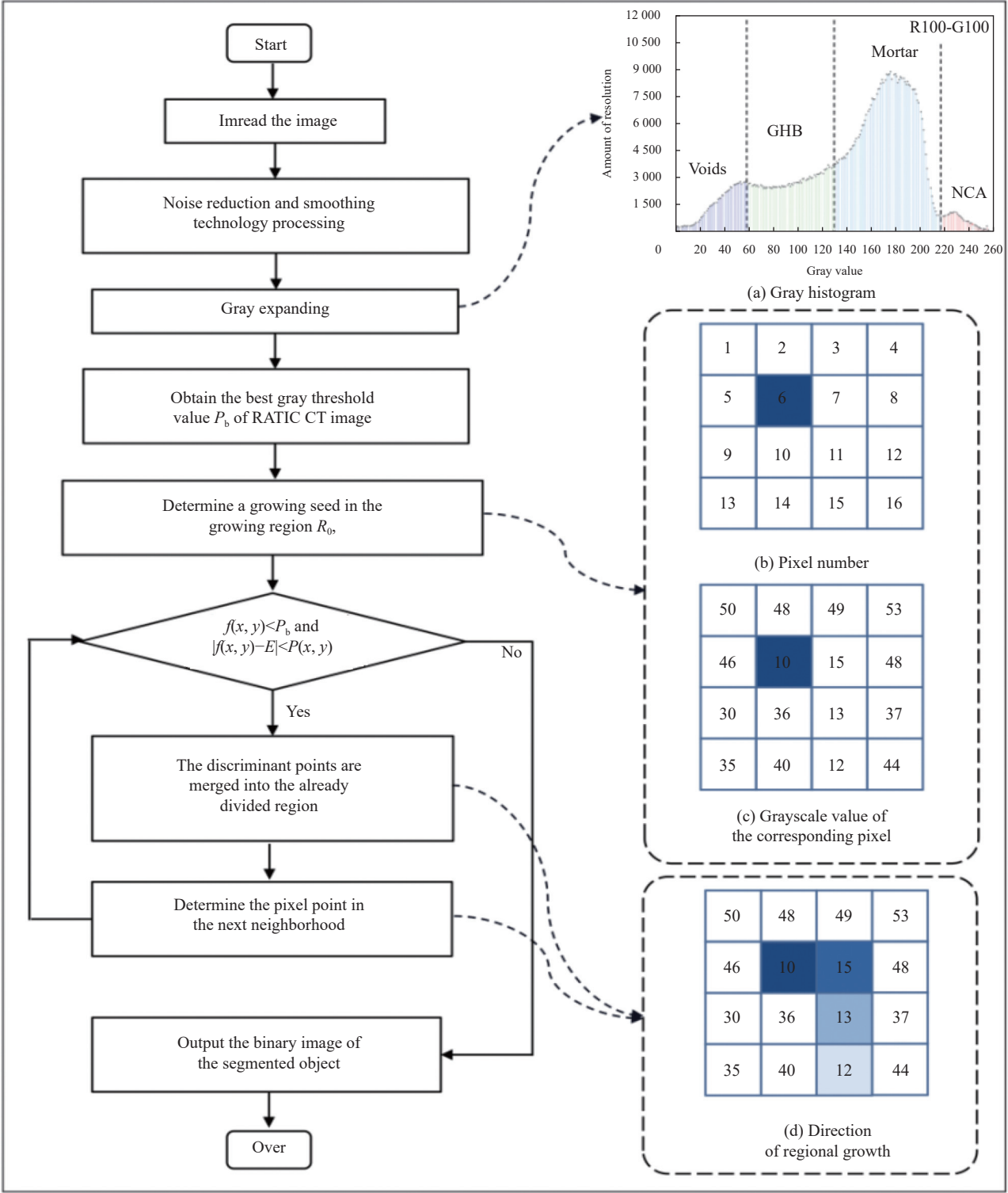


图 8 改进的基于阈值法和区域生长法的图像分割方法算法实现图

Fig. 8 Algorithm flow chart of the improved threshold segmentation method based on threshold method and region growing method

所示), 其实现步骤如下:

(1) 基于 MATLAB 软件, 用自适应阈值分割方法中的最大类间方差法得到了灰度直方图的最佳灰度阈值 P_b , 并由以下两式得到了图像灰度值的均值 E 和标准差 σ :

$$E = \frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in R} f(x,y) \tag{2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in R} |f(x,y) - E|^2} \tag{3}$$

式中, n 为像素点的的总个数。

(2) 在待分割区域 R_0 确定一个生长种子点 6, 其 4 邻域连通像素点为 2、5、7、10 点, 由下式可知像素点 7 的灰度值与种子点 6 的灰度值最接近: $|f(x,y) - E| < P(x,y)$

且当像素点 7 的灰度值满足以下关系时:

$$P(x,y) = \left(1 - \frac{\sigma}{m}\right) P_c \tag{5}$$

$$f(x,y) < P_b \tag{6}$$

式中, P_c 为根据种子生长区域设定的反映生长苛刻程度的量, 其可动态调整。

像素点 7 被加入到分割区域中, 并更新区域 R_0 中像素点的灰度值的均值 E 和标准差 σ , 像素点 6 和 7 作为新的种子点执行后面的过程。在第二次循环过程中, 待分割图像中种子点的相邻像素点为 2、3、5、8、10 和 11, 像素点 11 的灰度值和已分割的区域 (由 6 和 7 组成) 的灰度均值 12.5 最接近, 当像素点 11 的灰度值同时也小于 P_b 时, 像素点 11 也被加入到分割区域中, 直到像素点灰度值不满足图 8 所示的判别条件之一时, 区域生长结束。图 8(d) 示意了区域生长的方向 (颜色由深入浅)。

由 CT 扫描图像可知, RATIC 具有复杂的细观结构, 为了简化细观模型的建立和后续的仿真模拟过程, 同文献 [6], 在建模过程中忽略了 GHB 与 N-CPM 之间的界面过渡区对 RATIC 细观力学性能的影响, 仅考虑 NCA 与 O-CPM 之间的旧界面过渡区 (O-ITZ)、N-CPM 与 NCA 和 O-CPM 之间新界面过渡区 (N-ITZ) 的影响。采用 IISA, 并利用 MATLAB 中 Bwareaopen 函数对粒径较小的骨料和孔洞进行剔除, 首先得到了 RCA、NCA、O-CPM 和 GHB 和孔隙的二值化分割图像 (图 9), 可知二值化分割图像边界较清晰, 且无噪声干扰, 得到了较理想的图像分割结果。利用 Canny 算子

对二值化图像进行边缘检测, 并利用自编 MATLAB 程序获得了边界的真实 x - y 坐标信息。利用 MATLAB 算法将 RCA 外扩 0.03 mm 后得到 N-ITZ 边界, 利用 ABAQUS 中的布尔减运算, 将 NCA 和 O-CPM 从 RCA 中去除, 得到了 O-ITZ, 其厚度为 0.05 mm, 最终在 ABAQUS 中建立了基于真实结构的 RATIC 二维细观模型。

4 高温后 RATIC 损伤模拟分析

由于蒸汽压力对应力场和应变场具有与热膨胀系数相似的作用, 为了简化仿真模拟的流程, 同文献 [12], 蒸汽压力由单元的热膨胀系数模拟。高温后 RATIC 的细观仿真模拟的具体流程如下: 为了使模拟结果更好地接近实际情况, 证明 RATIC 细观仿真模拟的可行性, 采用与试验相同的升温曲线, 借助有限元分析软件 ABAQUS, 基于前文生成的考虑 RATIC 初始缺陷的二维真实细观模型, 对高温下 RATIC 的温度裂缝和温度应力进行仿真模拟研究。模拟时, 构件设置四面受火温度场, 约束试件底部的所有自由度, 试件左右为自由端, 网格类型采用 CPE3T 单元, 网格大小为 1 mm。

4.1 边界条件设置

高温下 RATIC 内部的温度场分布不仅与外界环境有关, 还与自身的细观非均质特性相关。通常来说, 影响物体内部温度场分布的传热现象有 3 种: 对流换热、热传导和辐射换热。由于高温下辐射换热对混凝土导热系数及内部温度场分布有较小影响 [27], 因此仅考虑热传导和对流换热对高温下 RATIC 细观性能的影响。根据能量守恒定律, 一般条件下, RATIC 瞬态热传导方程可用下式表示:

$$c\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q(x,y,z,t) \tag{7}$$

其中, $Q(x,y,z,t)$ 为物体内部有热源时单位体积在单位时间内产生的热量, 令 $a^2 = k/c\rho$, 则有:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + q(x,y,z,t) \tag{8}$$

其中, $q(x,y,z,t) = Q(x,y,z,t)/c\rho$, 当混凝土在后期正常工作时, $Q(x,y,z,t) = 0$, 于是, 高温下 RATIC 二维热传导方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \tag{9}$$

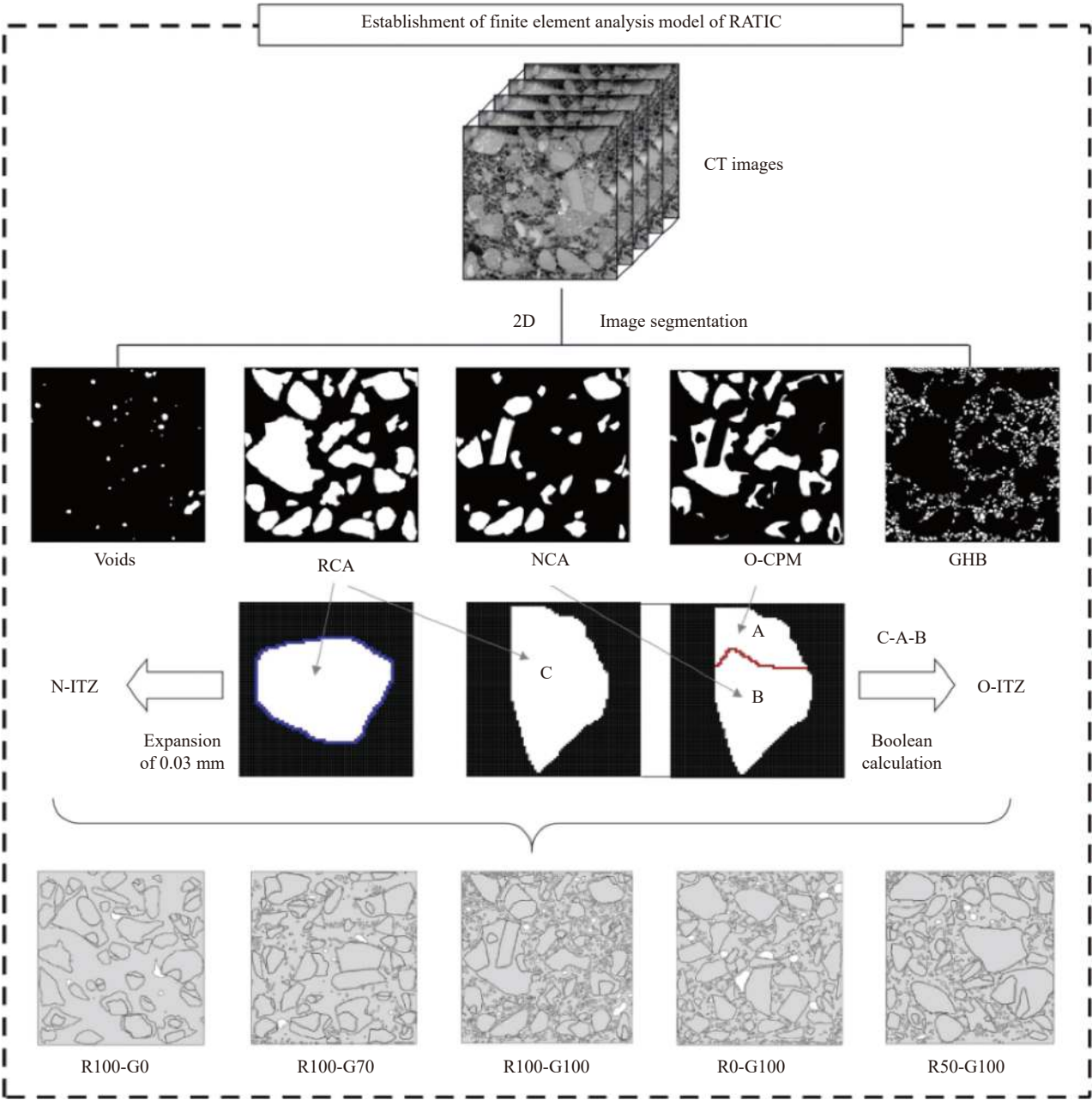


图9 RATIC 微观模型的建立

Fig. 9 Establishment of finite element analysis model of RATIC

为了计算高温下 RATIC 内部的温度场和温度应力分布，还需设置 RATIC 数值构件模拟的初始条件和边界条件，具体设置如下：

(1) 初始条件

$u(x,y,z,t)|_{t=0} = \varphi(x,y,z)$ (10)

(2) 边界条件

① Dirichlet 边界条件 (指定构件边界温度)

$u(x,y,z,t)|_{\Gamma} = g(x,y,z,t)$ (11)

② Robin 边界条件 (指定对流换热条件)

$k \frac{\partial u}{\partial n} = h(u_f - u_s)$ (12)

式中， u_s 、 u_f 和 h 分别为物体表面温度、周围流体温度和对流换热系数。

4.2 模拟参数设置

由于温度的变化对 GHB 的热膨胀系数、导热系数和比热容有较小影响，为简化计算，取其常温下参数进行模拟，不同温度下 RATIC 其他细观组分的热工参数利用假定数据及文献 [28-30] 的关系式计算，关系式如下：

$$K_{N-CPM,T}/K_{N-CPM,0} = 1.026 - 0.013R + 0.04043R^2 \quad (13)$$

$$K_{a,T} = \frac{770}{0.72(350+T)} + 0.7 \quad (14)$$

$$c_{N-CPM,T} = 790 + 0.9T \quad (15)$$

$$c_{a,T} = 625(1+T)^{0.075} \quad (16)$$

$$\rho_T/\rho_0 = \begin{cases} -0.000056T + 1.000112 & 20^{\circ}\text{C} \leq T < 100^{\circ}\text{C} \\ -0.000342T + 1.031152 & 100^{\circ}\text{C} \leq T < 300^{\circ}\text{C} \\ -0.000230T + 1.011713 & 300^{\circ}\text{C} \leq T < 800^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (17)$$

$$\alpha_{a,T} = 1.5 \times 10^{-5} + 7 \times 10^{-8}(T - T_0) \quad (18)$$

$$\alpha_{N-CPM,T} = 1.5 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-11}(T - T_0)^2 \quad (19)$$

式中： $R=T/100$ 、 $c_{N-CPM,T}$ 、 $K_{N-CPM,T}$ 和 $\alpha_{N-CPM,T}$ 分别为高温下 N-CPM 的比热容、导热系数和热膨胀系数，O-CPM 的热工参数取 N-CPM 的 1.05 倍，N-ITZ 的导热系数和热膨胀系数分别为 N-CPM 的 1.1 倍和 1.4 倍，O-ITZ 的热工参数为 N-ITZ 的 0.95 倍； $K_{N-CPM,0}$ 为常温下 N-CPM 的导热系数； T_0 为室温，通常取 20°C ； $c_{a,T}$ 、 $K_{a,T}$ 和 $\alpha_{a,T}$ 分别为高温下 NCA 的比热容、导热系数和热膨胀系数； ρ_T 和 ρ_0 分别为高温下和常温下 RATIC 的密度。

由于 RATIC 各细观组分在高温下的力学性能

试验研究薄弱，没有可以使用的参数，因此假定高温下 RATIC 中各细观组分子学性能退化规律与 RATIC 相同，采用文献 [23] 所得到的 RATIC 抗压强度、抗拉强度和弹性模量在高温下与常温下的比值随温度变化的关系式对高温下 RATIC 各细观组分的力学参数进行计算，关系式如下：

$$f_{c,T}/f_c = 0.946 + 0.237R - 0.0871R^2 + 0.00552R^3 \quad 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \quad (20)$$

$$f_{t,T}/f_t = \begin{cases} 1 - 0.003528(T - 20) & 20^{\circ}\text{C} \leq T < 100^{\circ}\text{C} \\ 0.4168 + 0.3018R & 100^{\circ}\text{C} \leq T < 200^{\circ}\text{C} \\ 1.8773 - 0.509R + 0.0438R^2 + 0.001056R^3 & 200^{\circ}\text{C} \leq T < 800^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (21)$$

$$E_{c,T}/E_c = 1.0109 - 0.03676R - 0.04213R^2 + 0.003999R^3 \quad 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \quad (22)$$

式中， $f_{t,T}$ 、 $f_{c,T}$ 、 $E_{c,T}$ 和 f_t 、 f_c 、 E_c 分别为高温下和常温下 RATIC 的抗拉强度、抗压强度和弹性模量。

常温下，O-CPM 和 N-ITZ 的强度分别取 0.9 倍和 0.7 倍的 N-CPM 强度，O-ITZ 强度为 0.7 倍的 O-CPM。常温下 RATIC 各细观组成成分的热工参数和力学参数设置列于表 4。

表 4 常温下 (20℃) RATIC 各细观组分的热工参数和力学参数

Table 4 Thermal parameters and mechanical parameters of meso-scale constituents of RATIC at room temperature (20℃)								
Constitution	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$k/(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	$c/(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1})$	$\alpha/^{\circ}\text{C}^{-1}$	f_c/MPa	f_t/MPa	E_c/MPa	P
NCA	2 600	3.100	798 ^[29]	7.00×10^{-6}	100.5	10.0	6.50×10^4	0.15
N-CPM	2 350	1.900 ^[30]	813 ^[28]	1.45×10^{-5}	40.0 ^[30]	4.0 ^[30]	3.00×10^4	0.22
O-CPM	2 300	1.950	850	1.50×10^{-5}	36.0	3.6	2.85×10^4	0.22
N-ITZ	2 300	2.100	906 ^[30]	2.00×10^{-5}	28.0	2.8	2.10×10^4	0.20
O-ITZ	2 280	2.000	860	1.95×10^{-5}	25.0	2.5	2.00×10^4	0.20
GHB	140	0.032	1 050	3.00×10^{-5}	—	—	2.40×10^4	0.23

Notes: ρ —Density; k —Thermal conductivity; c —Specific heat; α —Coefficient of thermal expansion; f_c —Compressive strength; f_t —Tensile strength; E_c —Elasticity modulus; P —Poisson’s ratio; N-CPM—New cement paste and mortar; O-CPM—Old cement paste and mortar; N-ITZ—New interface transition zone; O-ITZ—Old interface transition zone.

4.3 高温后 RATIC 损伤模拟结果分析

不同时间下受火阶段和自然冷却阶段的温度场和温度应力分布见图 10 和图 11。可知，RATIC 试件温度较高的区域温度应力也相应较大。

在受火前期，试件温度分布由外向内呈现出逐渐降低的趋势，随着试件所处环境温度的升高，其温度应力也逐渐增大并向内传递直至全截面内外温度差为 0，而降温阶段温度场和温度应力的变化规律与升温阶段相反，这与 Jin 等^[29]的研究

结果一致。此外，当 RCA 取代率相同时，RATIC 全截面达到受火温度的时间和受火后降温到室温所需的时间均随着 GHB 含量的增加而呈现增加的趋势；而 GHB 含量一定时，3 种不同 RCA 取代率的 RATIC 时间差别不大(图 12)，表明 GHB 对温度的传递有一定的抑制作用^[6]。

不同受火温度下，各组别的 RATIC 的温度应力随时间的变化见图 13，可知，各组别的 RATIC 的温度应力均随着受火时间的增加表现为先升高

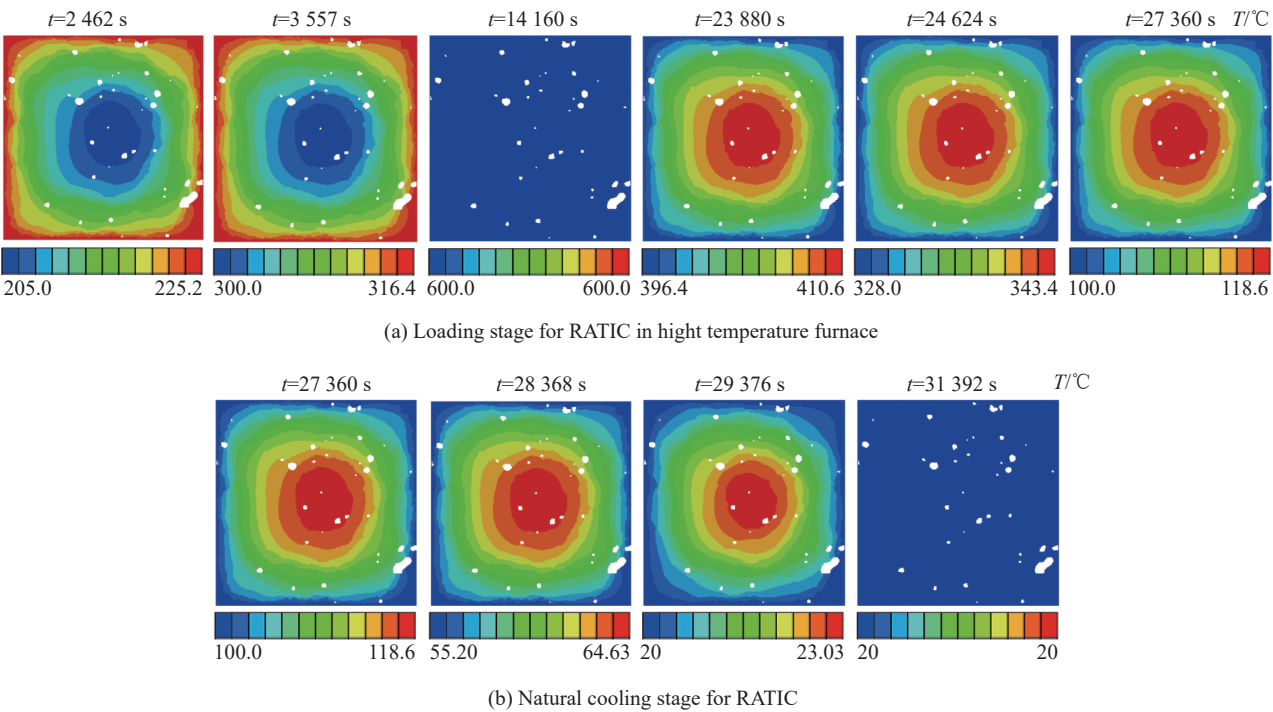


图 10 不同时间下受火阶段和自然冷却阶段的 RATIC 温度场分布

Fig. 10 Temperature field distribution of RATIC in the fire stage and the natural cooling stage

后趋于稳定然后降低的趋势，这与 Bangi 等^[31]的研究成果：混凝土内部蒸汽压力随受火温度的升高表现为先升高后降低的趋势有所差别，其主要是由于在实际的蒸汽压力测试中，蒸汽压力会随着混凝土内部水分的蒸发而消失，其在恒温阶段并不是定值；且最大温度应力随着温度的升高呈现出增大的趋势。以 R50-G100 为例，其在 300℃ 和 600℃ 时的最大温度应力分别为 1.736 MPa 和 3.512 MPa，而其在 300℃ 和 600℃ 时的劈裂抗拉强度分别 2.88MPa 和 0.76MPa^[23]，且研究表明 RATIC 的轴心抗拉强度为 0.78 倍的劈裂抗拉强度^[7]。根据 Springenschmid^[32]提出的损伤判断准则：当最大温度应力与轴心抗拉强度的比值介于 0.7~1 时，混凝土有极大的可能出现开裂，当比值大于 1 时，混凝土已经开裂。因此当受火温度为 300℃ 和 600℃ 时，模拟条件下最大温度应力与轴心抗拉强度的比值分别为 0.77 和 5.92，其在一定表明：模拟条件下，300℃ 时仅可能出现少量裂纹，而 600℃ 时会有大量裂纹出现，这与试验现象是一致的，证明了仿真模拟的可行性。

此外，当 RCA 取代率相同时，与 GHB 含量为 0 的 RATIC 试件相比，R100-G70 和 R100-G100 在受火温度为 300℃ 和 600℃ 时的最大温度应力

分别提高了 4.1% 和 14.6%、1.8% 和 5.7%，表明随着作用温度的升高，掺有 GHB 的混凝土和 GHB 含量为 0 的 RATIC 试件之间的内部温度应力愈加接近，其在一定程度上表明，高温环境下，掺有 GHB 的 RATIC 与普通混凝土相比，具有同等优异的抗压承载性能；当 GHB 含量一定时，R0-G100 有较小的温度应力。R100-G100 和 R50-G100 的在 300℃ 和 600℃ 时最大温度应力均比较接近，其表明 RATIC 高温后的内部温度应力随 RCA 掺量的进一步增加并没有产生明显的变化，在一定程度上可反应二者的残余力学性能基本相同。这均与高温后 RATIC 的残余抗压强度较好吻合。此外，温度应力首先出现于 N-ITZ 和 O-ITZ，最后向 O-CPM 和 N-CPM 拓展，模拟条件下裂纹的最终分布状态也与试验结果类似。综上表明：基于真实结构的 RATIC 细观模型可较好地模拟高温后 RATIC 的细观劣化性能。

5 结论

采用 CT 设备采集了混凝土断面图像，利用基于自适应阈值法和区域生长法图像分割方法得到了各细观组分的二值化分割图像，采用 MATLAB 自编程序获得了各细观组分边界及其真实 x-y 坐标信息，最终建立了再生保温混凝土 (RATIC) 细

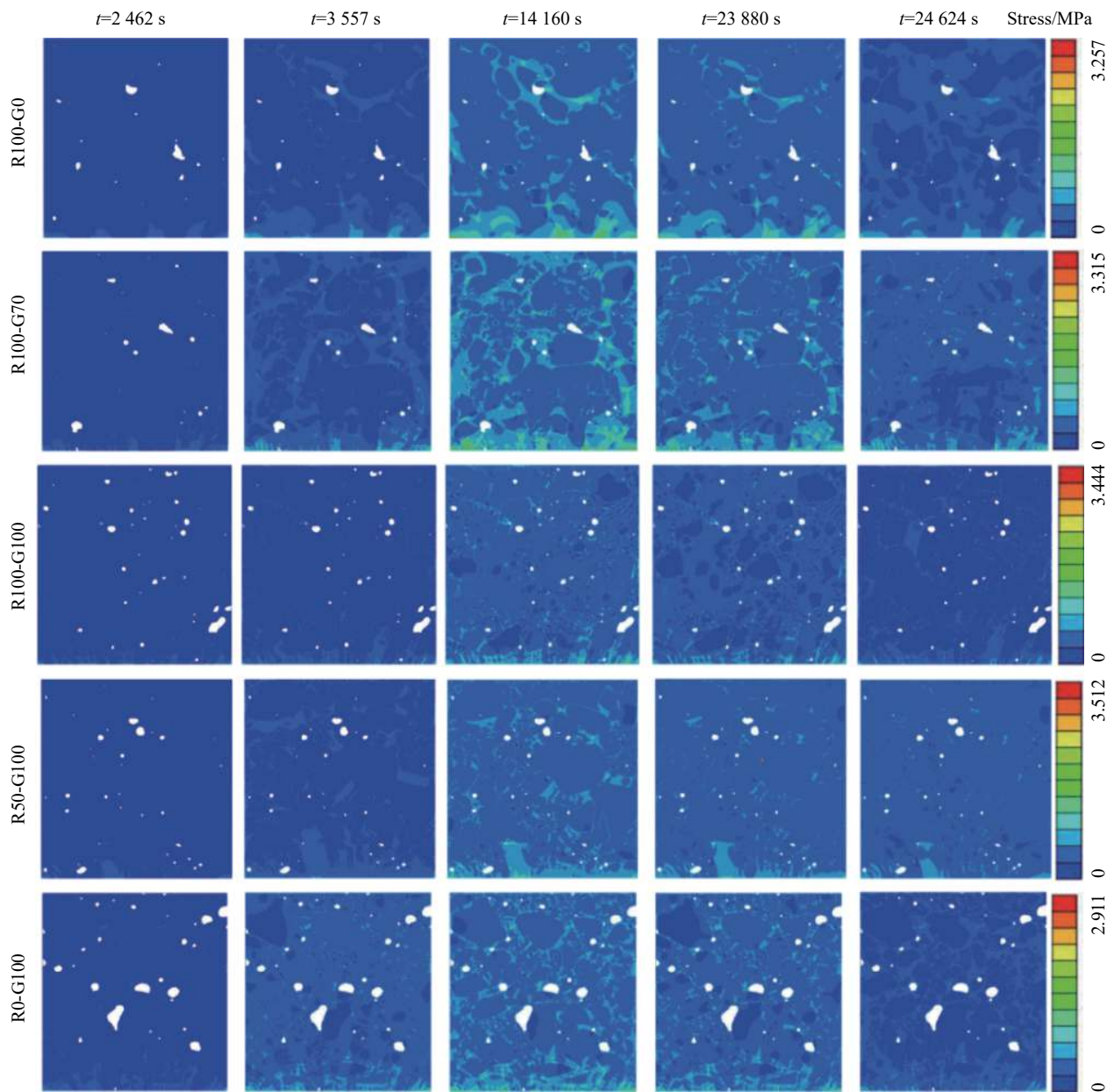


图 11 不同受火时间下 RATIC 试件的温度应力分布 (600℃)

Fig. 11 Temperature stress distributions of RATIC specimens at different fire time (600℃)

观模型，对比分析了模拟和试验条件下不同玻化微珠 (GHB) 和再生骨料 (RCA) 掺量的 RATIC 试件随温度变化时其内部微裂纹的孕育、萌生、发展及贯通过程。得到的主要结论如下：

- (1) RATIC 在火灾中的主要结构损伤发生在 300℃ 以后。在 300~600℃ 阶段掺加 GHB 可以有效提升混凝土的抗高温性能，缓解砂浆区域、孔隙边界处的开裂和混凝土力学性能的衰减，并且混凝土抵抗高温的能力随着 GHB 掺量的增大而提高；
- (2) 模拟条件下，当受火温度为 300℃ 时，仅有少数裂纹出现于混凝土的边缘，随着受火温度

的提高，微裂缝逐渐变宽并向内拓展，主裂纹与次裂纹串接汇合。当温度为 600℃ 时，可以明显的看到宽裂纹的出现，裂纹已遍布整个混凝土截面，且裂纹主要分布于新旧砂浆结合处、旧砂浆基体 (O-CPM) 和天然骨料 (NCA) 结合处及 NCA 和新砂浆基体 (N-CPM) 结合处，这与 CT 扫描试验高度吻合，表明：基于真实结构的 RATIC 细观模型可较好地模拟高温后 RATIC 的细观劣化性能；

(3) 模拟条件下，当 RCA 取代率相同时，RATIC 内部的温度应力随着 GHB 含量的增加呈现出增大的趋势；且随着作用温度的升高，掺有 GHB 的混

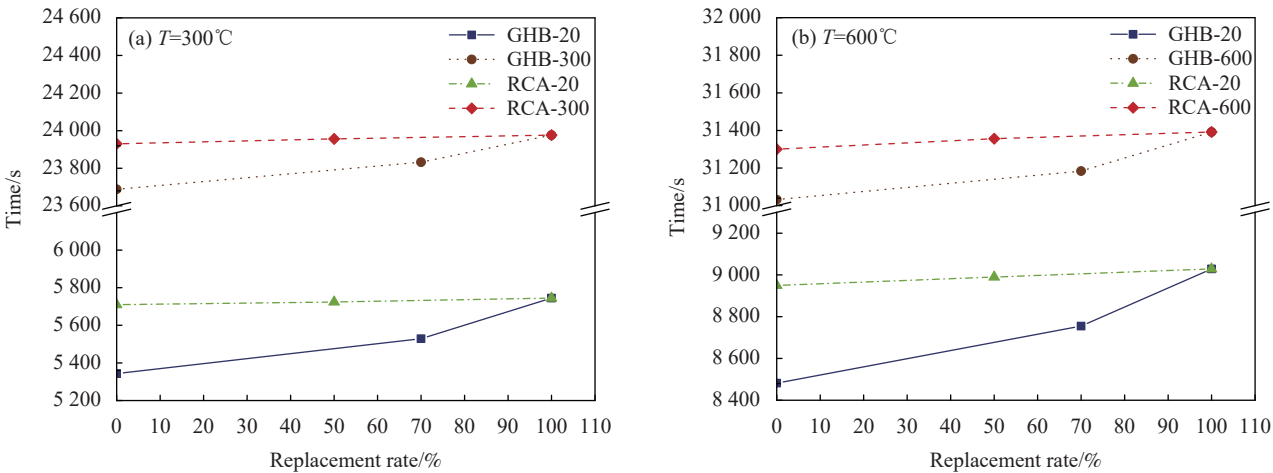


图 12 不同受火温度下 RATIC 全截面达到受火温度和降温到室温所需的时间

Fig. 12 Time required for the full section of RATIC to reach the fire temperature and cool down to room temperature at different temperatures

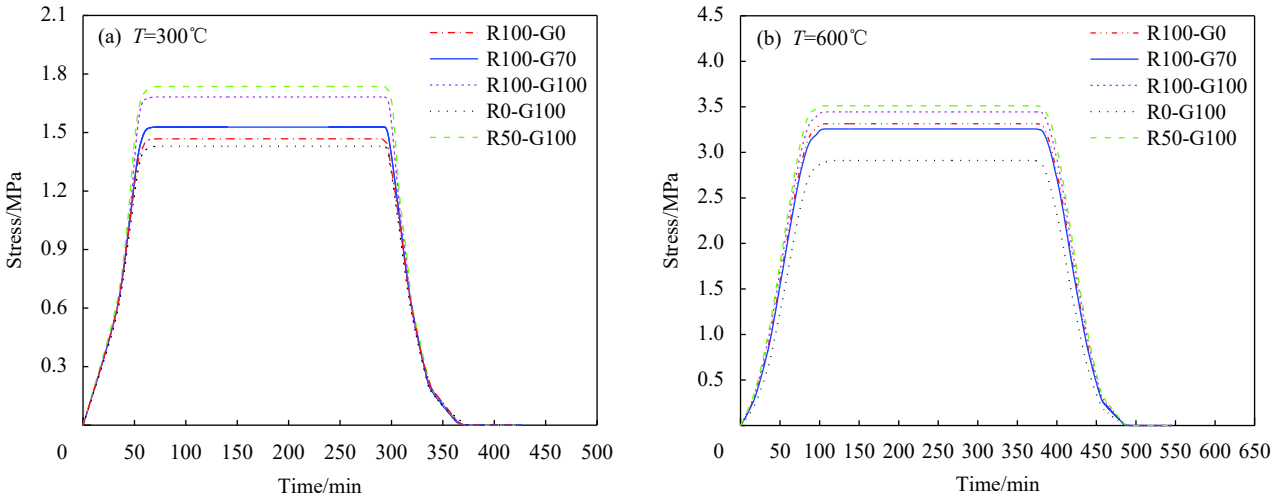


图 13 不同受火温度下 RATIC 的最大温度应力随时间的变化

Fig. 13 Maximum temperature stresses of RATIC specimens change with time at different fire temperatures

凝土和 GHB 含量为 0 的 RATIC 试件之间的内部温度应力愈加接近。此外 R100-G100 和 R50-G100(R 和 G 分别表示 RCA 和 GHB, 以 R100-G100 为例, 其表示 RCA 体积取代率为 100% 和 GHB 体积比为 100% 的的 RATIC 试件) 的在 300°C 和 600°C 时最大温度应力均比较接近, 这均与高温下 RATIC 的残余抗压强度较好吻合, 表明: 高温后混凝土的残余抗压强度可用内部的温度应力来反映。

参考文献:

[1] CHANG Y, WILKINSON S, POTANGAROA R, et al. Managing resources in disaster recovery projects[J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2012, 19(5): 557-580.

[2] CUI S, LIU P, SU J, et al. Experimental study on mechanical and microstructural properties of cement-based paste for

shotcrete use in high-temperature geothermal environment[J]. Construction and Building Materials, 2018, 174: 603-612.

[3] HAY R, DUNG N T, LESIMPLE A, et al. Mechanical and microstructural changes in reactive magnesium oxide cement-based concrete mixes subjected to high temperatures[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 118: 103955.

[4] KODUR V K R, DWAIKAT M B. Effect of fire induced restraint on fire resistance of reinforced concrete beams[J]. Journal of Structural Fire Engineering, 2010, 1(2): 73-88.

[5] RYU E, KIM H, CHUN Y, et al. Effect of heated areas on thermal response and structural behavior of reinforced concrete walls exposed to fire[J]. Engineering Structures, 2020, 207: 110165.

[6] TU J, WANG Y, ZHOU M, et al. Heat transfer mechanism of glazed hollow bead insulation concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 40(2): 102629.

[7] WANG W, ZHAO L, LIU Y, et al. Mechanical properties and

- stress-strain relationship in axial compression for concrete with added glazed hollow beads and construction waste[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 71: 425-434.
- [8] ZHANG Y, MA G, WANG Z, et al. Shear behavior of reinforced glazed hollow bead insulation concrete beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 174: 81-95.
- [9] ZHANG Y, LI B B, LI Z, et al. Seismic performance of interior beam-column joints in reinforced glazed hollow bead insulation concrete frames[J]. *Engineering Structures*, 2021, 228: 111494.
- [10] LI Y, ZHANG D. Effect of lateral restraint and inclusion of polypropylene and steel fibers on spalling behavior, pore pressure, and thermal stress in ultra-high-performance concrete (UHPC) at elevated temperature[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 271: 121879.
- [11] FU Y, LI L. Study on mechanism of thermal spalling in concrete exposed to elevated temperatures[J]. *Materials and Structures*, 2011, 44(1): 361-376.
- [12] 张科, 黄海东. 基于简化分析方法的混凝土高温爆裂数值模拟[J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(2): 268-278.
- ZHANG K, HUANG H D. Numerical simulation on high temperature cracking of concrete based on simplified analysis method[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2020, 40(2): 268-278(in Chinese).
- [13] HENRY M, DARMA I S, SUGIYAMA T. Analysis of the effect of heating and re-curing on the microstructure of high-strength concrete using X-ray CT[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 67: 37-46.
- [14] 赵昕, 徐世烺, 李庆华. 高温后超高韧性水泥基复合材料冲击破碎形特征分析[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(2): 44-55.
- ZHAO X, XU S L, LI Q H. Fractal characteristics of fire-damaged ultra high toughness cementitious composite after impact loading[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(2): 44-55(in Chinese).
- [15] 杜红秀, 樊亚男. 基于X-CT的C60高性能混凝土高温微观结构损伤研究[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(1): 210-215.
- DU H X, FAN Y N. Meso-structure damage of C60 high performance concrete at high temperature based on X-CT[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(1): 210-215(in Chinese).
- [16] XU S, SHEN L, WANG J, et al. High temperature mechanical performance and micro interfacial adhesive failure of textile reinforced concrete thin-plate[J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2014, 15(1): 31-38.
- [17] FARES H S, NOUMOWE A, COUSTURE A. High temperature behaviour of self-consolidating concrete: microstructure and physicochemical properties[J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40: 488-496.
- [18] LIU X, YUAN Y, YE G, et al. Study on pore structure evolution of high performance concrete with elevated temperatures[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2008, 36: 1473-1478.
- [19] LIU Y X, HU J G, HOU S. SEM analysis of concrete heated on varied temperature[J]. *Fire Safety Science*, 2005, 15: 80-83.
- [20] KALIFA P, MENNETEAU F D, QUENARD D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures[J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(12): 1915-1927.
- [21] BAŽANT Z P. Analysis of pore pressure, thermal stresses and fracture in rapidly heated concrete [A]. *Proceedings of international workshop on fire performance of high-strength concrete (NIST Special Publication 919)*[C]. Gaithersburg: NIST, 1997: 155-164.
- [22] 朋改非, 黄艳竹, 张九峰. 骨料缺陷对再生混凝土力学性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(1): 80-84.
- PENG G F, HUANG Y Z, ZHANG J F. Influence of defects in recycled aggregate on mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(1): 80-84(in Chinese).
- [23] LIU Y, JI H, ZHANG J, et al. Mechanical properties of thermal insulation concrete with recycled coarse aggregates after elevated temperature exposure[J]. *Materials Testing*, 2016, 58(7-8): 669-677.
- [24] 刘利先, 吕龙, 刘铮, 等. 高温下及高温后混凝土的力学性能研究[J]. *建筑科学*, 2005(3): 16-20.
- LIU L X, LV L, LIU Z, et al. Investigation on mechanical behaviors of concrete at and after elevated temperature[J]. *Building Science*, 2005(3): 16-20(in Chinese).
- [25] RASHAD A M, BAI Y, BASHEER P A M, et al. Chemical and mechanical stability of sodium sulfate activated slag after exposure to elevated temperature[J]. *Cement of Concrete Research*, 2012, 42(2): 333-343.
- [26] BASTAMI M, BAGHBADRANI M, ASLANI F. Performance of nano-Silica modified high strength concrete at elevated temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 68: 402-408.
- [27] VOSTEEN H D, SCHELLSCHMIDT R. Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock[J]. *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, 2003, 28(9-11): 499-509.
- [28] CERNÝ R, MADĚRA J, PODĚBRADSKA J, et al. The effect of compressive stress on thermal and hygric properties of Portland cement mortar in wide temperature and moisture ranges[J]. *Cement & Concrete Research*, 2000, 30(8): 1267-1276.
- [29] JIN L, HAO H M, ZHANG R B, et al. Determination of the effect of elevated temperatures on dynamic compressive properties of heterogeneous concrete: A meso-scale numerical study[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 188: 685-694.
- [30] JIN L, ZHANG R B, DU X L. Characterisation of temperature-dependent heat conduction in heterogeneous concrete[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2017, 70(7-8): 325-339.
- [31] BANGI M R, HORIGUCHI T. Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures[J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(11): 1150-1156.
- [32] SPRINGENSCHMID R. Prevention of thermal cracking in concrete at early ages[M]. Boca Raton: CRC Press, 1998.