

磷铝酸盐相变材料对受火混凝土高温损伤的 同步修复研究

高芙蓉^{1,2,3}, 姬永生^{1,2,3}, 马占国^{1,2,3}, 仇群彤^{1,3}, 张 洁^{1,3,4}

- (1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;
2. 江苏建筑职业技术学院 江苏建筑节能与建造技术协同创新中心, 江苏 徐州 221116;
3. 中国矿业大学 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室, 江苏 徐州 221116;
4. 徐州工业职业技术学院 建筑工程学院, 江苏 徐州 221140)

摘要: 火灾高温效应下, 硅酸盐水泥基混凝土内形成大量宏、细、微观裂缝(或高温损伤), 严重削弱受火混凝土的力学性能。如何有效修复高温损伤对改善受火混凝土力学性能具有重要意义。本文通过将研制的磷铝酸盐相变材料掺入硅酸盐水泥, 高温-冷却过程中借助相变材料的固-液-固相变, 实现同步修复受热水泥基体内高温损伤。通过确定磷铝酸盐相变材料对硅酸盐水泥高温后抗压强度、微观结构和矿物组成的影响规律, 研究了磷铝酸盐相变材料对水泥基体内高温损伤的同步修复作用和对水泥高温后力学性能的改善效果。研究表明, 掺加磷铝酸盐相变材料的水泥试件高温后微观结构完整, 基体内裂缝明显少于纯水泥试件。高温后, 掺加磷铝酸盐相变材料胶砂试件的抗压强度明显高于纯水泥胶砂试件。

关键词: 受火混凝土; 高温损伤; 磷铝酸盐相变材料; 同步修复; 力学性能

中图分类号: TU525

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)05-0661-08

Study on simultaneous repair of thermal-induced cracks within fire-exposed concrete by aluminophosphate phase change materials

GAO Furong^{1,2,3}, JI Yongsheng^{1,2,3}, MA Zhanguo^{1,2,3}, QIU Quntong^{1,3}, ZHANG Jie^{1,3,4}

- (1. China University of Mining and Technology, State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Jiangsu Collaborative Innovation Center for Building Energy Saving and Construct Technology, Xuzhou 221116, China;
3. China University of Mining and Technology, Jiangsu Key Laboratory Environmental Impact and Structural Safety in Engineering, Xuzhou 221116, China;
4. Xuzhou College of Industrial Technology, School of Architecture Engineering, Xuzhou 221140, China)

Abstract: Under high temperature effect of fire, a large number of macro, fine and micro cracks (or thermal-induced cracks) are formed in Portland cement-based concrete, which seriously weakens the mechanical properties of fire-exposed concrete. Therefore, how to effectively repair thermal-induced cracks within concrete matrix is of great significance to improve mechanical strengths of fire-exposed concrete. In this investigation, a specially prepared aluminophosphate phase change material was mixed with Portland cement to realize simultaneous repair of thermal-induced cracks within concrete matrix by means of solid-liquid-solid phase transitions of the phase change material during heating and cooling process. The corresponding simultaneous repair effect on thermal-induced cracks within cement matrix and the improvement effect on mechanical properties of cement after high temperatures were investigated by determinations of changes in compressive strengths, micro structures and mineral compositions. The results show that the microstructure of cement specimens with aluminophosphate phase change materials is complete after high temperature, and the cracks in the matrix are significantly less than those of pure cement specimens. After high temperature, the compressive strength of the mortar specimens mixed with the

收稿日期: 2022-07-15

修回日期: 2023-01-02

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1904304); 国家自然科学基金(51972337); 江苏建筑节能与建造技术协同创新中心青年博士基金指导项目(SJXTBZ2102)

第一作者: 高芙蓉(1989—), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为土木工程新材料, 混凝土抗火. E-mail: furonggao@sina.com

aluminophosphate phase change material is significantly higher than that of the pure cement mortar specimens.

Key words: fire-exposed concrete; aluminophosphate phase change materials; thermal-induced cracks; simultaneous repair; mechanical property

硅酸盐水泥基混凝土是房屋建筑领域最常采用的结构材料之一。房屋建筑在使用过程中可能遭遇火灾。虽然硅酸盐水泥基混凝土属于不燃材料,但其热稳定性较差。火灾高温效应下,混凝土水化产物、骨料等组分发生一系列物理、化学变化^[1-3],基体内形成大量裂缝,混凝土力学性能显著退化,严重削弱受火混凝土结构的承载能力,使得受火混凝土结构存在极大安全隐患^[4-6]。修复高温损伤对改善受火混凝土力学性能,保证受火混凝土结构的安全性具有重要意义。

目前,受火混凝土高温损伤主要采取事后修复措施,包括高温后再养护和微生物矿化沉积等修复方法^[7,8]。高温后再养护法的裂缝修复原理是:水泥的水化产物水化硅酸钙(C-S-H)和氢氧化钙(CH)高温分解形成的 C_nS 和 CaO 能够与水反应,再次生成 C-S-H 和 CH;随着再养护龄期增加,C-S-H 和 CH 逐渐增加、不断积累,充填并修复受火混凝土内高温损伤,改善基体微结构密实性^[9-10]。研究表明,再养护后受火混凝土的抗压强度可恢复 10%~70%^[11-14]。

微生物矿化沉积的裂缝修复原理为:微生物新陈代谢过程中产生的碳酸根(CO_3^{2-})与混凝土孔隙溶液中钙离子(Ca^{2+})结合,形成不溶于水的碳酸钙($CaCO_3$)^[15-16]。微生物不断进行新陈代谢, CO_3^{2-} 不断与混凝土孔隙液中 Ca^{2+} 反应生成 $CaCO_3$, $CaCO_3$ 逐渐充填并修复混凝土内裂缝。研究表明,受火混凝土损伤通过微生物矿化沉积修复后,其毛细吸水量和渗透性显著降低^[17-18]。

然而,为有效修复混凝土高温损伤,受火混凝土需置于水中再养护;微生物矿化沉积修复法需要将受火混凝土浸于微生物培养液中养护,使微生物能进入混凝土内^[19-21]。室内试验条件下,上述事后修复措施可以修复受火混凝土的高温损伤,但却很难应用于实际受火混凝土结构高温损伤修复。同时,上述修复措施均是利用固相物质堆积修复受火混凝土内高温损伤^[22,23]。修复过程中,固相物质堆积由外向内逐渐推进。推进过程中,堆积的固相物质修复损伤,同时也堵塞了水的扩散通道,使混凝土内部损伤无法得到有效修复。上述事后修复措施很难实现高效率、高程度修复受火混凝土基体的高温损伤。如何有效修复受火混凝土基体的高温损伤仍是国内外材料学专家致力于解决的科学难题。

本文通过将研制的磷铝酸盐相变材料与硅酸盐水泥复合,高温-冷却过程中借助磷铝酸盐相变材料的固-液-固相变,实现同步修复受火混凝土基体内高温损伤。通过确定液化磷铝酸盐相变材料流动能力和磷铝酸盐相变材料对硅酸盐水泥高温后抗压强度、微观结构和矿物组成的影响,研究磷铝酸盐相变材料对水泥基体高温损伤的修复作用和对水泥高温后力学性能的改善作用。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 水泥

胶凝材料采用强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥(以下简称为 P·O42.5 水泥)。根据 Winner3003 激光粒度仪测定,P·O42.5 水泥颗粒的平均粒径为 $8.3\ \mu m$,其粒径分布如图 1 所示。P·O42.5 水泥化学组成如表 1 所示,其主要性能指标满足规范《通用硅酸盐水泥》(GB175—2007)的要求。

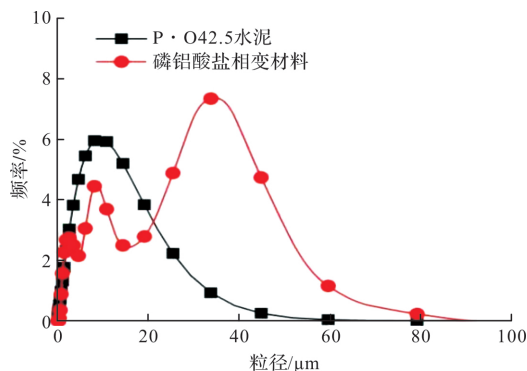


图 1 水泥及相变材料颗粒粒径分布

Fig. 1 Particle size distributions of cement and phase change materials

1.1.2 磷铝酸盐相变材料

本研究采用的磷铝酸盐相变材料于实验室内通过将均匀混合的 $NH_4H_2PO_4$, K_2CO_3 , Na_2CO_3 , Al_2O_3 和 SiO_2 等原材料以高温熔融方式合成。由于相变材料需要与 P·O42.5 水泥混合,因此需对高温熔融制得的块状材料进行破碎、球磨等处理以得到粉体材料。根据 Winner3003 激光粒度仪测定,粉体磷铝酸盐相变材料的比表面积为 $276.8\ m^2/kg$,其粒径分布如图 1 所示。磷铝酸盐相变材料颗粒微观形貌如图 2 所示。结合图 2 所示的元素能谱分布和根据 XRF 测定,磷铝酸盐相变材料主要由 P、Na、K、Al 和 O 等元素组成,其含量如表 2 所示。

表 1 P·O 42.5 水泥的主要化学组成及其含量

Tab. 1 Chemical composition and content of P·O 42.5

化学组成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	f-CaO	L. O. I
含量/%	21.85	5.62	2.99	61.55	2.64	0.44	0.92	2.53

表 2 磷铝盐相变材料元素组成及其含量

Tab. 2 Element composition and content of aluminophosphate phase change materials

元素组成	Si	Ca	K	Mg	P	Na	Al	Other
含量/%	4.5	5.8	15.5	-	20	22	32	0.2

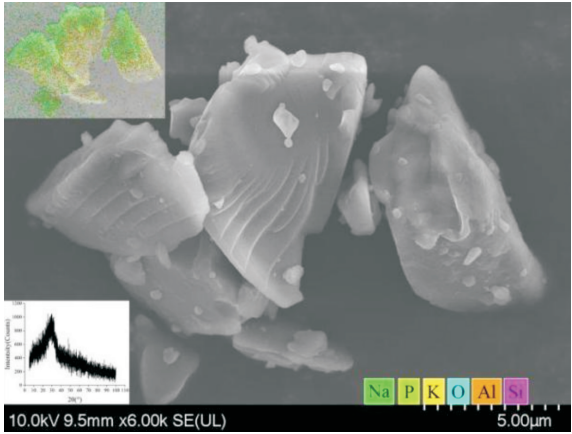


图 2 磷铝酸盐相变材料微观形貌特征

Fig. 2 Microstructural characteristics of aluminophosphate phase change materials

1. 1. 3 其他

细骨料采用硅质标准砂, 其比重和细度模数分别为 2.81 和 2.86。细骨料的性能指标满足规范《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ 2—2006)的要求。试验用水采用主要性能指标符合《混凝土用水标准》(JGJ 63—2006)要求的自来水。

1. 2 试件制备

1. 2. 1 试件的配合比

考虑到高温下磷铝酸盐相变材料形成的液相过量可能会对试件的力学强度产生负面影响, 因此磷铝酸盐相变材料的最大掺量不超过 10%。试件的配合比如表 3 所示, 各组试件的水胶比为 0.5, 水泥与细骨料的比例为 1:3, 磷铝酸盐相变材料的掺量分别为水泥质量的 0%、2.5%、5%、7.5%和 10%。

表 3 试件的配合比

Tab. 3 Mix proportions of specimens

试件编号	水泥/g	磷铝酸盐相变材料/g	水/g	砂/g	备注
T2.5	450	11.25	225	1 350	试验组
T5	450	22.5	225	1 350	
T7.5	450	33.75	225	1 350	
T10	450	45	225	1 350	
R0	450	0	225	1 350	参照组

1. 2. 2 试件制备及养护

根据规范《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—1999), 按照表 3 所示试件配合比制备 5 组 40 mm×40 mm×160 mm 胶砂试件。试件脱模后置于标准养护箱内进行养护(相对湿度≥95%, 温度: 20±2℃)。标准养护 28 d 后, 将试件置于 105℃烘箱内进行干燥, 直至试件的质量无明显变化。

1. 3 高温及冷却方案

根据温度对混凝土力学性能的影响规律可知, 当温度高于 400℃时混凝土的力学强度开始逐渐下降; 当温度高于 800℃时, 混凝土的力学强度几乎完全丧失。因此, 为研究磷铝酸盐相变材料对硅酸盐水泥高温后力学性能的改善规律, 本研究将目标温度分别设定为 500、600、700 和 800℃。为消除受热过程中试件内外产生温度差的现象, 各目标温度的升温速率为 10℃/min、恒温时间 2 h。高温试验后, 关闭高温炉电源并将试件置于高温炉中自然冷却至室温。高温及冷却制度如图 4 所示。

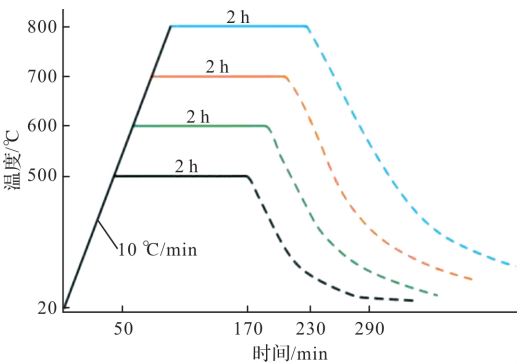


图 4 高温及冷却制度

Fig. 4 Heating and cooling regimes of high temperature experiment

2 试验内容

2. 1 液化磷铝酸盐相变材料流动性能

当温度高于磷铝酸盐相变材料的固-液相变点时, 磷铝酸盐相变材料发生固-液相变, 由固相变为具有一定流动能力的液相。高温后粉体磷铝酸

盐相变材料试件形状由规则变为不规则,如图 5(a)所示.因此,根据试件形状的变化情况可确定高温下液化磷铝酸盐相变材料的流动能力.

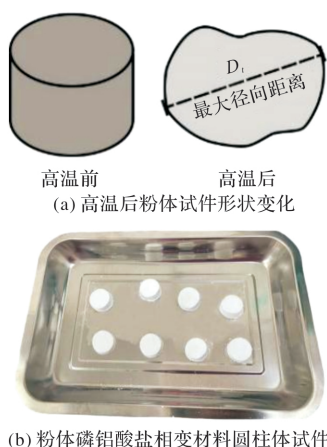


图 5 高温后粉体磷铝酸盐相变材料试件形状变化示意图及圆柱体试件的制备

Fig. 5 Shape changes in powder aluminophosphate phase change material specimens after high temperature and preparation of cylindrical specimens

将粉体磷铝酸盐相变材料制成直径为 20 mm, 高为 10 mm 圆柱体试件,如图 5(b)所示.高温后采用精度为 0.01 mm 的游标卡尺测量变形试件的最大径向距离,记为 D_t .液化磷铝酸盐相变材料的流动能力可通过高温后变形试件的最大径向距离进行确定,如式(1)所示.

$$\Delta D_t = D_t - D_0 \quad (1)$$

式中: D_0 为圆柱体试件初始直径, mm; D_t 为高温后变形试件的最大径向距离, mm; ΔD_t 为高温下熔融磷铝酸盐相变材料最大流动距离, mm.

2.2 高温后抗压强度

采用 40 mm×40 mm×160 mm 棱柱体胶砂试件研究磷铝酸盐相变材料对硅酸盐水泥高温后抗压强度的影响规律.根据规范《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—1999),采用 30 t 液压抗压强度试验机以 2.5 kN/s 加载速率,确定受热胶砂试件的抗压强度.

2.3 高温后微观结构特征

采用 40 mm 立方体净浆试件研究磷铝酸盐相变材料对水泥基体高温后微观结构的影响规律.净浆试件分别为纯水泥石和磷铝酸盐相变材料掺量为 10% 的水泥石.高温试验结束后,将冷却的试件制成 5 mm 立方块体,采用 FEI Quanta TM 250 扫描电镜在 25 kV 加速电场下观察试件的微观结构.

2.4 矿物组成

采用 40 mm 立方体净浆试件研究磷铝酸盐相变材料对受热水泥石矿物组成的影响规律.净浆试件分别为纯水泥石和磷铝酸盐相变材料掺量为 10% 的水泥石.高温试验结束后,将冷却的试件破碎、研磨成粒径小于 40 μm 的粉体,采用 D8 ADVANCE X-射线衍射仪,测定 2θ 衍射角度范围为 $5^\circ \sim 70^\circ$ 内受热水泥石矿物组成的变化规律.

3 结果与讨论

3.1 液化磷铝酸盐相变材料的流动性能

高温前后磷铝酸盐相变材料圆柱体试件的形状变化如图 6 所示.由图 6 可得高温下液化磷铝酸盐相变材料的最大流动距离,如表 4 所示.由图 6 可以看出,当温度高于 500°C 时,高温后粉体磷铝酸盐相变材料圆柱体试件变为不规则致密化块体.随着温度逐渐升高,致密化块体的表面积逐渐增大.根据高温前后粉体圆柱体试件的形状变化情况可知,当温度高于 500°C 时磷铝酸盐相变材料可发生固-液相变,形成具有一定流动能力的液相.冷却过程中,液化磷铝酸盐相变材料发生液-固相变,形成致密化坚硬块体.



图 6 高温前后磷铝酸盐相变材料圆柱体试件的形状变化
(注:块状试件呈黑色由盛放试件的金属托盘高温变色所致,非磷铝酸盐相变材料自身颜色)

Fig. 6 Shape changes of cylindrical specimens of aluminophosphate phase change materials before and after high temperatures

由表 4 可以看出,随着温度由室温增加至 500、600、700 和 800°C ,液化磷铝酸盐相变材料最大流动距离由 10.54 mm 增加至 17.86、28.66 和 37.14 mm.因此,液化磷铝酸盐相变材料的流动能力随着温度增加而逐渐增加.

表 4 液化相变材料的最大流动距离(mm)

Tab. 4 Maximum flow distance of liquefied phase change materials

温度/℃	500	600	700	800
D_t	30.54	37.86	48.66	57.14
ΔD_t	10.54	17.86	28.66	37.14

3.2 高温后抗压强度

胶砂试件高温后抗压强度如图 7 所示。由图 7 可以看出，500、600、700 和 800℃后，对于未掺磷铝酸盐相变材料的胶砂试件，其抗压强度逐渐降低，分别为 40.2、32.0、25.5 和 19.91 MPa。当磷铝酸盐相变材料掺量分别为 2.5% 和 5% 时，胶砂试件高温后抗压强度逐渐降低。但是相同高温作用后，其抗压强度均高于未掺磷铝酸盐相变材料的胶砂试件。

当磷铝酸盐相变材料掺量为 7.5% 时，500℃和 600℃后胶砂试件的抗压强度分别为 51.1 MPa 和 52.5 MPa，均高于其常温抗压强度，抗压强度增加幅度分别为 4.8% 和 7.5%。随着温度增加至 700℃和 800℃，胶砂试件高温后抗压强度逐渐降低，分别为 46.3 MPa 和 36.5 MPa。其中，700℃后试件的抗压强度与常温时未掺磷铝酸盐相变材料的胶砂试件相当。

当磷铝酸盐相变材料掺量为 10% 时，与试件的常温抗压强度相比，500℃和 600℃后胶砂试件的

抗压强度增加，分别为 52.3 MPa 和 55.2 MPa，增加幅度分别为 7.8% 和 13.9%。随着温度增加至 700℃和 800℃，试件高温后抗压强度逐渐降低，分别为 46.5 MPa 和 36.8 MPa。

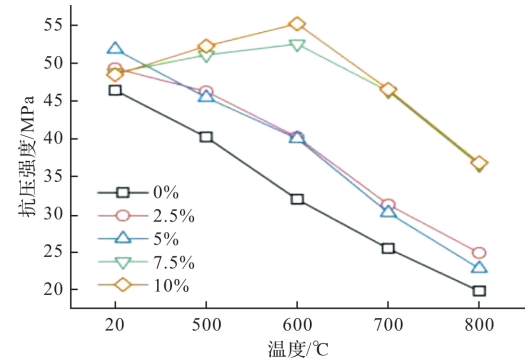


图 7 胶砂试件高温后抗压强度

Fig. 7 Compressive strengths of mortar specimens after high temperature

3.3 高温后微观结构特征

3.3.1 纯水泥试件

纯水泥试件高温后微观结构如图 8 所示。由图 8(a)可以看出，500℃后水泥基体内开始出现明显的微裂缝。600℃后水泥基体内裂缝逐渐增多、变宽，并开始呈相互贯通的趋势，如图 8(b)。700℃和 800℃后，水泥基体内裂缝急剧增多，并相互贯通形成裂缝网，造成基体“龟裂酥碎”，如图 8(c)和(d)所示。

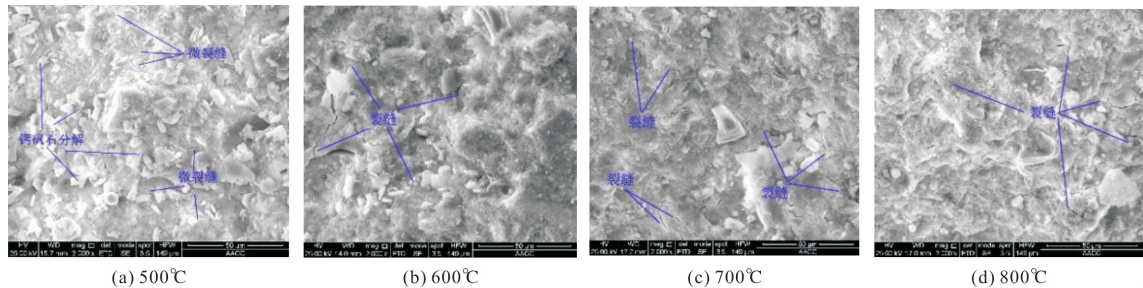


图 8 纯水泥试件高温后微观结构

Fig. 8 Micro structures of pure hardened cement stone after elevated temperatures

3.3.2 掺加 10% 磷铝酸盐相变材料的水泥试件

掺加 10% 磷铝酸盐相变材料的水泥试件高温后微观结构如图 9 所示。由图 2 可知，高温前磷铝酸盐相变材料颗粒棱角分明，且表面存在较多因破碎、球磨而形成的划痕。由图 9 可以看出，高温后水泥基体内分布的磷铝酸盐相变材料颗粒圆滑而平整，表面划痕消失。这说明，高温和冷却过程中水泥基体内的磷铝酸盐相变材料发生固-液-固相变，从而使材料颗粒发生明显形貌变化。

由图 9 可以看出，掺加磷铝酸盐相变材料的水泥基体内，相变材料颗粒的圆滑程度随着温度增加而增加，这说明高温下基体内磷铝酸盐相变材料形成的液相的流动能力随着温度的增加而增加。同时，相同高温作用后掺加磷铝酸盐相变材料的基体内裂缝明显少于纯水泥。虽然，基体内裂缝间相互贯通形成裂缝网，但是裂缝网稀疏，基体完整性较好。由图 9(d)可以看出，800℃后水泥基体内无明显裂缝，微观结构完整性较高。

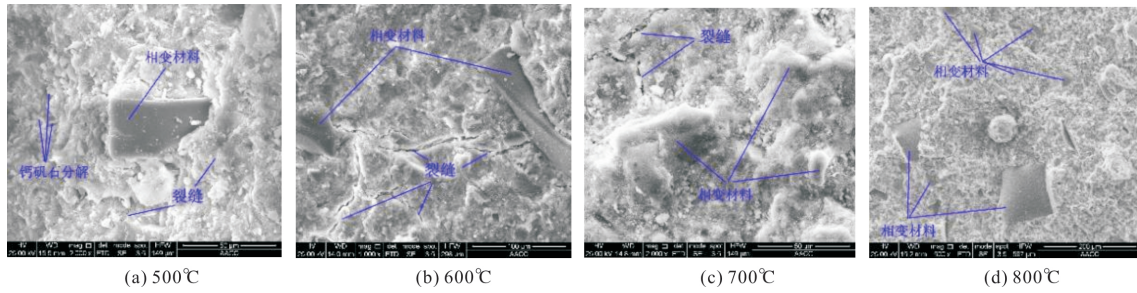


图 9 掺加 10% 相变材料的水泥试件高温后微观结构

Fig. 9 Micro structures of hardened cement stone with 10% of phase change materials after elevated temperatures

3.4 矿物组成

不同高温作用后水泥试件的矿物组成如图 10 所示。由图 10 可以看出, 500℃ 后水泥试件的 XRD 衍射图谱中出现硅酸钙衍射峰, 这说明 500℃ 时水泥基体内 C-S-H 已经分解。随着温度的

增加, 硅酸钙的衍射峰逐渐增加, 这说明硅酸钙的分解程度随着温度的增加而增加。同时, 当温度为 700℃ 时, XRD 衍射图谱中氢氧化钙的衍射峰消失, 这说明 700℃ 时水泥基体内氢氧化钙已经全部分解。

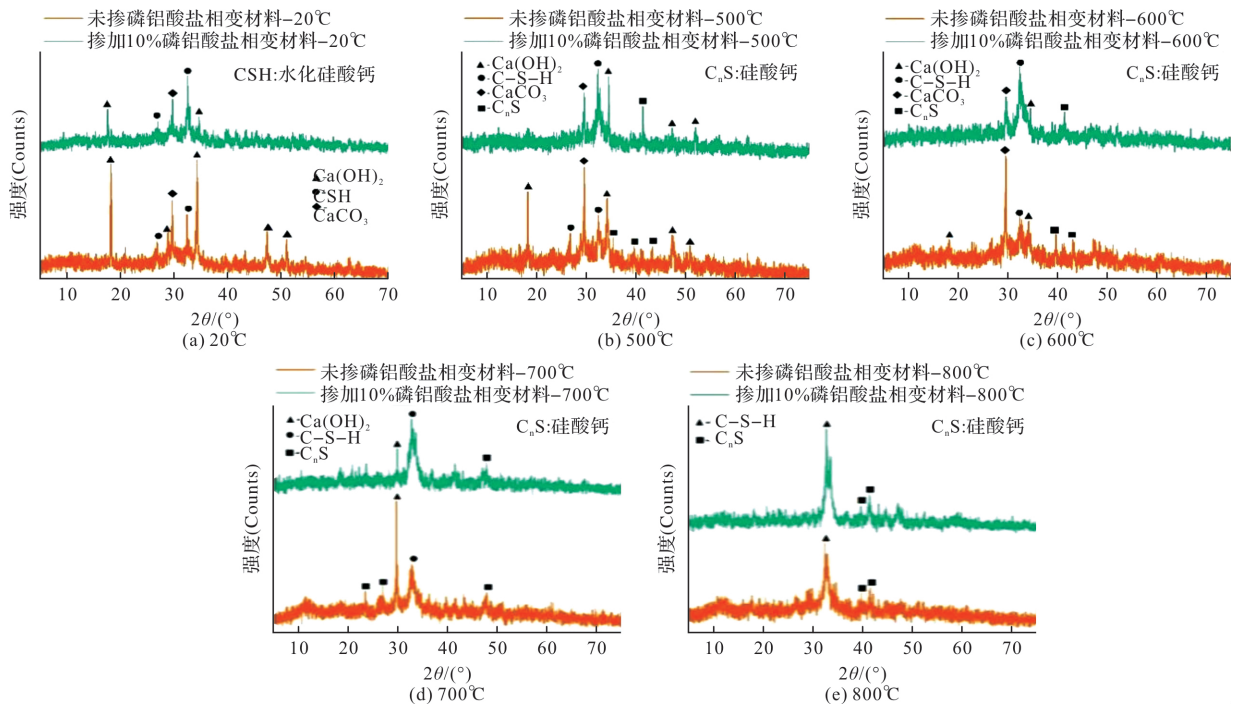


图 10 高温前后水泥试件的物相变化

Fig. 10 Changes in mineral compositions of hardened cement stone after elevated temperatures

4 机理分析

根据高温后水泥石矿物组成的变化规律可知, 500℃ 时水泥基体内 C-S-H 和 CH 开始分解, 其中 C-S-H 分解程度较低。由于水化产物的分解, 水泥基体呈现收缩趋势, 因此水泥基体内形成大量高温裂缝^[24,25]。同时, 作为粘结相的 C-S-H 为水泥强度的主要来源, 其分解会造成水泥力学性能下降^[26]。因此, 500℃ 后纯水泥胶砂试件的抗压强度开始降低。随着温度不断增加, 水化产物的分解程度逐渐增加, 水泥基体收缩加剧, 裂缝急剧增

加、发展并相互贯通, 进而导致纯水泥胶砂试件高温后抗压强度大幅下降。800℃ 时, CH 完全分解、C-S-H 也几乎完全分解, 水泥基体内高温裂缝进一步显著增加与扩展, 水泥的抗压强度几乎完全丧失。

对于掺加磷铝酸盐相变材料的水泥, 高温时水化产物的分解情况与纯水泥相同。高温下磷铝酸盐相变材料发生固-液相变, 形成具有一定流动能力的液相。液相在水泥基体内流动、充填于裂缝; 冷却过程中, 裂缝内液化磷铝酸盐相变材料发生液-固相变而成为致密化坚硬固相, 从而修复

基体的高温裂缝。因此,高温后掺加磷铝酸盐相变材料的水泥试件微观结构比较完整,胶砂试件抗压强度显著高于纯水泥胶砂试件。

随着磷铝酸盐相变材料掺量增加,高温时水泥基体内形成的液相逐渐增加,基体的裂缝填充和修复效果越好。因此,当掺量高于7.5%且温度不高于700℃时,胶砂试件高温后抗压强度高于其常温抗压强度。随着温度进一步升高,C-S-H分解程度逐渐增加,对胶砂试件抗压强度的削弱作用逐渐显著。虽然高温-冷却过程中,磷铝酸盐相变材料能修复基体的高温裂缝,但无法避免粘结相C-S-H脱水分解。因此,当温度高于700℃时,胶砂试件高温后抗压强度随着温度的增加而逐渐降低。

5 结论

(1)高温时,磷铝酸盐相变材料发生固-液相变,形成具有一定流动能力的液相,且液相的流动能力随着温度的升高而逐渐增加;冷却过程中,液化磷铝酸盐相变材料发生液-固相变,成为致密化固相;

(2)磷铝酸盐相变材料可显著提高水泥高温后抗压强度。相同高温作用后,掺加磷铝酸盐相变材料胶砂试件的抗压强度显著高于纯水泥胶砂试件,且随着磷铝酸盐相变材料掺量的增加而逐渐增加;当磷铝酸盐相变材料掺量高于7.5%时,500℃和600℃后胶砂试件抗压强度高于其常温抗压强度;

(3)高温-冷却过程中,水泥基体内磷铝酸盐相变材料发生固-液-固相变,修复水泥基体的高温损伤,使得基体内高温损伤显著减少,从而提升了水泥基体结构的完整性。800℃后,掺加磷铝酸盐相变材料的水泥基体仍能保持较高的完整性。

参考文献 References

[1] 李忠友,刘元雪,姚志华. 普通硅酸盐混凝土高温性能劣化分析模型[J]. 防灾减灾工程学报,2020,40(2): 229-235.
LI Zhongyou, LIU Yuanxue, YAO Zhihua. Analysis model on deterioration of ordinary silicate concrete under high temperature[j]. journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2020, 40(2): 229-235.

[2] 白卫峰,韩浩田,管俊峰,等. 考虑高温劣化效应的混凝土统计损伤本构模型研究[J]. 应用基础与工程科

学学报,2020,28(6):1398-1409.

- BAI Weifeng, HAN Haotian, GUAN Junfeng, et al. Statistical damage model of concrete considering the effect of high temperature degradation[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28 (6): 1398-1409.
- [3] HAGER I. Behaviour of cement concrete at high temperature[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences (Technical Sciences), 2013, 61(1): 145-154.
- [4] 申嘉荣,徐千军. 高温对混凝土孔隙结构改变和抗压强度降低作用的规律研究[J]. 材料导报,2020,34(1): 46-51.
SHEN Jiarong and XU Qianjun. Characteristics of Pore Structure Change and Compressive Strength Reduction of Concrete Under Elevated Temperatures[J]. Materials Reports, 2020, 34(1): 46-51.
- [5] MA Q M, GUO R X, ZHAO Z M et al. Mechanical properties of concrete at high temperature-A review [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 371-383.
- [6] 金浏,张仁波,杜修力,等. 温度对混凝土结构力学性能影响的研究进展[J]. 土木工程学报,2021,54(3): 1-17.
JIN Liu, ZHANG Renbo, DU Xiuli, et al. Research progress on the influence of temperature on the mechanical performance of concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(3): 1-17.
- [7] LI L, SHI L, WANG Q Y, et al. A review on the recovery of fire-damaged concrete with post-fire-curing [J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117564.
- [8] 孙磊. 大豆脲酶诱导沉积碳酸钙修复混凝土高温损伤试验研究[D]. 太原:太原理工大学,2021.
SUN Lei. Experimental Study on Repairing Concrete High Temperature Damage by Soybean Urease Induced Deposited Calcium Carbonate[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [9] PARK S J, YIM H J, KWAK H G. Effects of post-fire curing conditions on the restoration of material properties of fire-damaged concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 99: 90-98.
- [10] AKCA A H, ÖZYURT N. Effects of re-curing on microstructure of concrete after high temperature exposure[J]. Construction and Building Materials, 2018, 168: 431-441.
- [11] LI Q T, YUAN G L, SHU Q J. Effects of heating/cooling on recovery of strength and carbonation resist-

- ance of fire-damaged concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 66(18): 925-936.
- [12] NOMAN M, YAQUB M, ABID M, et al. Effects of Low-Cost Repair Techniques on Restoration of Mechanical Properties of Fire-Damaged Concrete [J]. Frontiers in Materials, 2021, 8: 801464.
- [13] NALON G H, RIBEIRO J C L, DE ARAÚJO E N D, et al. Effects of post-fire curing on the mechanical properties of cement composites containing carbon black nanoparticles and multi-walled carbon nanotubes [J]. Construction and Building Materials, 2021, 310: 125118.
- [14] SURESH N, RAO V, AKSHAY B S. Evaluation of mechanical properties and post-fire cured strength recovery of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Structural Fire Engineering, 2022, 13(4): 491-505.
- [15] 李沛豪, 屈文俊. 细菌诱导碳酸钙沉积修复混凝土裂缝[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11): 64-70.
LI Peihao, QU Wenjun. Remediation of concrete cracks by bacterially-induced calcium carbonated deposition[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(11): 64-70.
- [16] 袁杰, 陈歆, 何虹霖, 等. 微生物矿化作用下混凝土裂缝修复与性能补偿[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(2): 641-647.
YUAN Jie, CHEN Xin, HE Honglin, et al. Repair and rejuvenation of cracked concrete by microbiologically induced calcite precipitation[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(2): 641-647(in Chinese).
- [17] NIMAFAR M, SAMALI B, HOSSEINI S J, et al. Use of Bacteria Externally for Repairing Cracks and Improving Properties of Concrete Exposed to High Temperatures[J]. Crystals, 2021, 11: 1503.
- [18] FAN Y N, DU H X, WEI H. Characteristics of Soybean Urease Mineralized Calcium Carbonate and Repair of Concrete Surface Damage[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Material Science Edition), 2021, 36(1): 70-76.
- [19] KARAHAN O. Residual compressive strength of fire-damaged mortar after post-fire-air-curing[J]. Fire and Materials, 2011, 35: 561-567.
- [20] YU K Q, LU Z D, YU J T. Residual compressive properties of strain-hardening cementitious composite with different curing ages exposed to high temperature [J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 146-155.
- [21] LIN Y, HSIAO C, YANG H, et al. The effect of post-fire-curing on strength-velocity relationship for nondestructive assessment of fire-damaged concrete strength[J]. Fire Safety Journal, 2011, 46: 178-185.
- [22] LI L, SHI L, WANG Q Y, et al. A review on the recovery of fire-damaged concrete with post-fire-curing [J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117564.
- [23] WEI H, FAN Y N, SUN L, et al. Experimental Study on High-Temperature Damage Repair of Concrete by Soybean Urease Induced Carbonate Precipitation[J]. Materials, 2022, 15: 2436.
- [24] ARIÖZ O. Effects of elevated temperatures on properties of concrete[J]. Fire Safety Journal, 2007, 42(8): 516-522.
- [25] KHALIQ W, MUJEEB A. Effect of processed pozzolans on residual mechanical properties and macrostructure of high-strength concrete at elevated temperatures [J]. Structural Concrete, 2019, 20(1): 307-317.
- [26] 高世壮, 薛善彬, 张鹏, 等. 高温作用对应变硬化水泥基复合材料吸水性能及微结构演化特征的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(10): 4778-4787.
GAO Shizhuang, XUE Shanbin, ZHANG Peng, et al. Effect of high temperature environment on water absorption and microstructure evolution of strain hardening cementitious composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(10): 4778-4787.

(编辑 桂智刚)