

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.086



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



高温历程对碱矿渣混凝土残余抗压强度的影响

马倩敏¹, 刘倩¹, 李黎山², 秦泉宇¹, 张淼¹, 史天尧¹

(1. 昆明理工大学建筑工程学院; 云南省土木工程防灾重点实验室, 昆明 650500; 2. 云南工业干部学院, 昆明 650500)

摘要: 为了探明高温历程对碱矿渣混凝土残余抗压强度的影响, 对不同升温速率(5、10 °C/min)、恒温时间(1、2 h)和冷却方式(自然冷却、浇水冷却)作用后的碱矿渣混凝土残余抗压强度进行表征, 并通过胶凝材料基体微观结构的高温变化对上述强度变化进行分析。结果表明: 升温速率较快的情况下, 当温度低于400 °C时, 热应力影响不明显, 由于受热时长较短, 残余强度较高; 随着温度升至800 °C, 热应力影响显著, 混凝土残余强度持续显著降低; 800 °C之后, 热应力达到一定程度, 较短的受热时长保证了较高的残余强度。恒温时间的延长会加剧胶凝材料基体结构及基体-骨料界面过渡区的劣化效应, 从而引起混凝土残余强度的降低。浇水冷却降低了水化产物C-S-H凝胶的分解温度, 并在混凝土内产生热应力, 残余强度损失明显。

关键词: 碱矿渣混凝土; 抗压强度; 高温历程; 胶凝材料; 微观结构

中图分类号: TU501 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)05-0168-07

Influence of temperature elevation on residual compressive strength of alkali activated slag concretes

MA Qianmin¹, LIU Qian¹, LI Lishan², QIN Xiaoyu¹, ZHANG Miao¹, SHI Tianyao¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics; Key Laboratory of Yunnan Province for Disaster Prevention in Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P. R. China; 2. Yunnan Institute of Industrial Administrators, Kunming 650500, P. R. China)

Abstract: This paper studied the influence of temperature increase rates (5, 10 °C/min), duration at target temperatures (1, 2 hours) and cooling methods (natural cooling, water cooling) on the residual compressive strength of alkali activated slag concretes after high temperature. The microstructural change of the alkali activated slag matrix with temperature elevation was also studied to analyze the strength change. The results show that when the higher temperature increase rate was used, within 400 °C, the influence of thermal stress

收稿日期: 2022-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(52068038); 云南省科技厅基础研究专项-面上项目(202101AT070089); 昆明理工大学分析测试基金(2020M20192210078)

作者简介: 马倩敏(1985-), 女, 博士, 副教授, 主要从事碱矿渣胶凝材料研究, E-mail: maqianmin666@163.com。
李黎山(通信作者), 男, 副研究员, E-mail: 1057177365@qq.com。

Received: 2022-03-03

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52068038); General Project of Basic Research Special Project of Yunnan Province Science and Technology Department (No. 202101AT070089); Analysis and Test Foundation of Kunming University of Science and Technology (No. 2020M20192210078)

Author brief: MA Qianmin (1985-), PhD, associate professor, main research interest: cementitious materials of alkali activated slag, E-mail: maqianmin666@163.com.

LI Lishan (corresponding author), associate researcher, E-mail: 1057177365@qq.com.

was not sufficient, and a shorter duration in heat could remain the strength of concretes at a considerable level; with temperature elevation to 800 °C, residual strength decreased dramatically with the increase of thermal stress; afterwards, thermal stress has achieved a certain extent, and a shorter duration in heat remained the strength. Increase in duration at target temperature has intensified the deterioration of alkali activated slag matrix and matrix-aggregates ITZ, resulting in the decrease of the residual strength. Water cooling has lowered the temperature of C-S-H hydrates to decompose, as well as resulted in thermal stress in concretes, and consequently limited the remain of the residual strength.

Keywords: alkali activated slag; compressive strength; temperature elevation; cementing material; microstructure

混凝土作为重要的建筑结构材料,发生火灾后的残余抗压强度是建筑灾后安全评估的重要指标。除了混凝土材料参数,高温历程(包括升温速率、恒温时间、冷却方式)也会对混凝土高温后残余抗压强度造成显著影响。碱矿渣混凝土作为一种环境友好型材料,已成功应用于现浇钢筋混凝土结构工程中^[1],并完成了相关行业标准的制定^[2]。对其高温后残余抗压强度进行表征,并探明高温历程的影响具有重要的现实意义。

关于升温速率的影响,Choe等^[3]研究发现,升温速率较快可缩短混凝土达到目标温度的时间,残余抗压强度得以很好保持。Mohamedbhai^[4]研究发现,当温度低于600 °C时,较大的升温速率会引起混凝土内部的温度梯度,在热应力作用下混凝土结构易破坏^[5],抗压强度降低;而温度高于600 °C时,升温速率的影响较小。陈明阳等^[6]研究发现,相同截面尺寸的混凝土,升温速率越大,混凝土受温时越易发生爆裂,且程度严重不利于强度的保持。对于碱矿渣混凝土,傅博^[7]研究发现,温度低于400 °C时,升温速率的影响并不显著。而在400~800 °C温度范围内,升温速率的增快加大了混凝土的内外温差,混凝土高温后残余抗压强度呈下降趋势。另一方面,关于恒温时间的影响,文献[8-10]中的研究结果均表明,随着恒温时间的延长,普通混凝土高温后残余抗压强度随之降低。傅博^[7]的研究表明,恒温时间的延长加剧了碱矿渣混凝土骨料的分解,从而加剧了该混凝土高温后质量和强度的损失。

混凝土高温后残余力学性能研究中,通常采用自然冷却方式,但这不符合消防实际(浇水冷却)。翟越等^[11]研究了冷却方式对普通混凝土在300、400、600、800 °C高温作用后抗压强度的影响,结果表明,在浇水冷却的方式下,氢氧化钙分解再水化所引起的体积膨胀使得混凝土的抗压强度急剧下降,因此,300 °C后,浇水冷却的混凝土高温后抗压强度更低。Bi等^[12]研究了普通混凝土在200、400、600 °C高温处理后,冷却方式对其抗压强度的影响,

结果表明,浇水冷却会造成混凝土表面出现更多裂纹,且其高温后相对残余抗压强度更低。郑钰涛等^[13]研究了普通混凝土在200~800 °C温度作用后冷却方式对混凝土力学性能的影响,结果表明,温度低于400 °C时,浇水冷却与自然冷却的影响没有显著差距,而在400~800 °C之间,氢氧化钙的分解再水化以及温度应力产生的裂缝使得浇水冷却的混凝土抗压强度降低速率更快。傅博^[7]的研究表明,在200~800 °C温度范围内,碱矿渣水泥石收缩产生的界面微裂纹可以减小混凝土内外温度梯度,能有效缓解由于急冷所产生的温度应力。因此,空气冷却与浇水冷却两种冷却方式下碱矿渣混凝土高温后的残余强度相差不大。

综上可知,高温历程对混凝土高温后残余强度影响显著,但碱矿渣混凝土相关研究数量较少。笔者进一步开展相关研究,对完善和丰富碱矿渣混凝土高温性能理论体系及工程应用数据支撑具有重要的科学和实际意义。

1 试验

1.1 原材料

矿渣:来自云南曲靖,实测矿渣28 d的活性指数为86%,为S75级矿渣。矿渣的化学组成见表1。由化学组成计算可得,矿渣的碱度系数为0.959,质量系数为1.711,活性系数为0.5。矿渣的XRD图谱见图1,由图可看出矿渣的XRD衍射曲线在 $2\theta=30^\circ$ 左右呈现弥散峰状,说明矿渣中含有大量玻璃体,此外还探测到少量石英(SiO_2)、镁黄长石($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$)、钙铝黄长石($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$)、镁蔷薇辉石($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$)等矿物晶相的存在。

水:云南省昆明市呈贡区自来水。

粗骨料:级配为5~20 mm的连续级配石灰岩

表1 矿渣的化学组成

Table 1 Chemical compositions of slag										%
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SO ₃	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	
38.26	31.40	15.71	6.90	2.94	1.43	1.23	0.96	0.53	0.38	

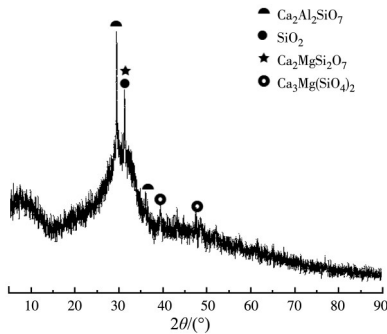


图 1 矿渣 XRD 图

Fig. 1 XRD pattern of slag

碎石。

细骨料:细度模数为 2.96 的机制砂,因砂中石粉含量较高(16.8%),制备混凝土前先将砂过筛,筛除石粉。

碱激发剂:采用水玻璃溶液作为激发剂,产地

为云南昆明,该水玻璃的 Na_2O 含量为 7.34%, SiO_2 含量为 21.62%,模数为 3.04,使用氢氧化钠(NaOH)将水玻璃模数调节至目标数值。所用 NaOH 为福晨(天津)化学试剂有限公司生产,其纯度不低于 96%。

1.2 配合比

制备混凝土试件时,水玻璃碱浓度(Na_2O 占矿渣质量的百分比)为 4%、6%、8%,水玻璃模数(M_s : $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$)为 1.0、1.5、2.0。胶凝材料(矿渣+水玻璃中固含量+ NaOH)用量为 380 kg/m^3 ,水胶比为 0.45(水玻璃中液含量计入水胶比计算),砂率为 40%。另制备碱矿渣净浆试件观察其微观结构随温升的变化,净浆试件的水玻璃碱浓度为 6%,模数为 1.5,水胶比为 0.30。碱矿渣混凝土和净浆试件的配合比见表 2。

表 2 碱矿渣混凝土和净浆的配合比以及混凝土常温时抗压强度

Table 2 Mix proportion of alkali activated slag concrete and paste and compressive strength of the concrete at room temperature

试件类型	碱浓度/%	水玻璃模数	材料用量/(kg/m^3)						常温时的抗压强度/MPa
			矿渣	水玻璃	氢氧化钠	水	细骨料	粗骨料	
混凝土	4	1.5	344.2	92.5	9.0	105.3	760.2	1 140.3	61.4(± 1.9)
	6	1.0	336.4	90.3	17.5	106.8	762.7	1 144.1	63.6(± 7.5)
	6	1.5	328.7	132.4	12.9	76.9	777.7	1 166.6	71.9(± 7.7)
	6	2.0	321.5	172.7	8.5	48.3	792.1	1 188.1	70.4(± 4.7)
	8	1.5	314.6	169.0	16.5	51.0	793.8	1 190.7	74.5(± 6.7)
净浆	6	1.5	432.8	120.6	15.6	80.9			

1.3 试样制备

拌合物搅拌完成后分两层浇筑至模具中(混凝土试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,净浆试件尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$),每层浇筑完成后置于振动台上振动,使拌合物振捣密实。试件成型后,静置待终凝完成,再以湿布覆盖其表面,24 h 后拆模。随后将试件放入温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度为 95% 的养护室中养护至 90 d。

1.4 试验方法

到达养护龄期后,部分混凝土试件用于常温抗压强度测试,其余试件则用于高温试验。将试件置于马弗炉内(洛阳宏达炉业有限公司生产),炉内温度以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率分别升至 200、400、600、800、1 000、1 200 $^\circ\text{C}$;达到目标温度后,让试件在目标温度下恒温 2 h,随后关闭电源,试件随炉自然冷却。为研究升温速率、恒温时间和冷却方式对碱矿渣混凝土高温后残余抗压强度的影响,在前述对照组标准条件基础上另进行 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温速率、1 h 恒温时间及浇水冷却条件下的测试。进行浇水冷却时,热状态下用钳子将试件夹出置于水池中,均

匀浇水使试件冷却至室温。实验参数及水平见表 3。试件冷却至室温后立即进行抗压强度测试。每组配合比每个温度测试 3 个平行试件,所报道的强度值为 3 个试件结果的平均值。抗压强度测试使用 WE-300 型液压式万能试验机(济南试验机厂制造),测试过程参照规范《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行。

表 3 实验参数及水平

Table 3 Experimental parameters and levels

温度/ $^\circ\text{C}$	升温速率/($^\circ\text{C}/\text{min}$)
200、400、600、800、1 000、1 200	5(对照标准)、10
恒温时间/h	冷却方式
2(对照标准)、1	自然冷却(对照标准)、浇水冷却

为探明碱矿渣胶凝材料基体微观结构在不同升温机制和冷却方式条件下的高温变化,另在同等条件下制备净浆试件用于观察。将常温和高温处理后的净浆试件进行破碎处理,取中间部分碎块放入无水乙醇中浸泡 3 d 以终止试件的水化。3 d 后取出放入真空干燥箱中干燥。微结构观察采用日本电子 JSM-7800F 扫描电镜(SEM)。

2 试验结果与分析

2.1 升温速率的影响

图 2 所示为升温速率对碱矿渣混凝土高温后的相对残余抗压强度(高温后抗压强度值与常温时抗压强度的比值)的影响。从图中可以看出,在 400 °C 之前,升温速率较快时,混凝土残余强度较高。较快的升温速率容易加大混凝土内外温差,从而引起混凝土内部热应力增大,不利于强度的保持^[4]。然而,此时目标温度较低,难以在混凝土中形成明显的温度梯度影响混凝土强度。而在恒温时间相同的情况下,较快的升温速率可缩短混凝土达到目标温度的时间^[3],从而缩短混凝土受高温作用的时长,削弱了高温对混凝土结构的破坏作用,所以混凝土可保持相对较高的残余强度。随着温度继续升高至 800 °C,当采用较快的升温速率时,虽然较短的受热时长可减缓水化产物的分解,但混凝土内外温差逐渐增大,热应力对混凝土结构造成的破坏作用更加显著,因此,残余抗压强度明显降低。这与傅博^[7]的研究结果基本一致。当热应力作用达到一定程度后(800 °C 之后),较快的升温速率(较短的受热时长)减缓了碱矿渣混凝土水化产物 C-S-H(I) 凝胶的持续分解,使残余强度在一定程度上得以保持。

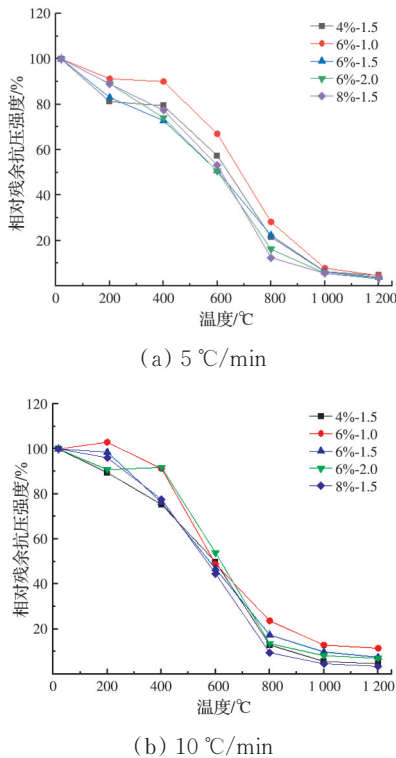


图 2 升温速率对碱矿渣混凝土高温后相对残余抗压强度的影响

Fig. 2 Influence of heating rate on the relative residual compressive strength of alkali activated slag concretes after high temperatures

从碱矿渣净浆试件的 SEM 图(图 3)也可以看出,升温速率较慢时,随温度从 800 °C 升至 1 200 °C,随着产物的分解,基体从原有较为完整的结构发展至蜂窝麻面密布,且有明显孔洞缺陷。然而当升温速率较快时,800 °C 情况下基体已有较为明显的孔洞缺陷,但该情况并没有随温升明显加剧。

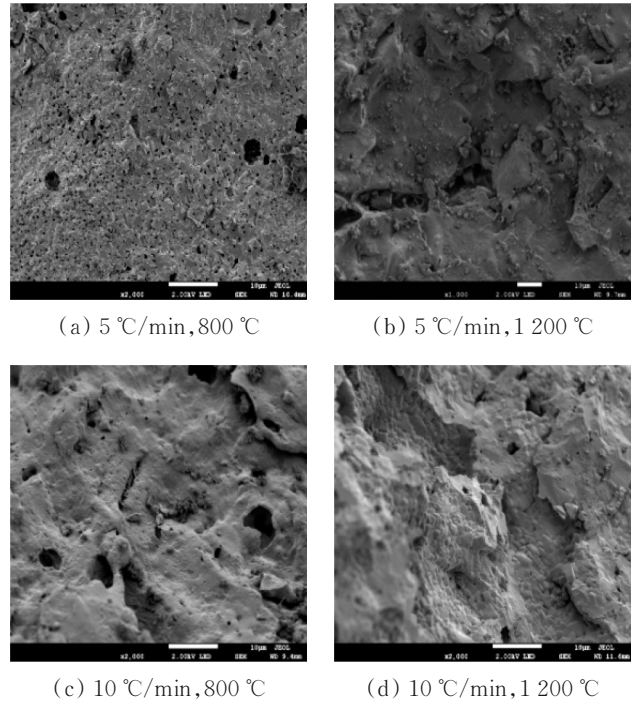


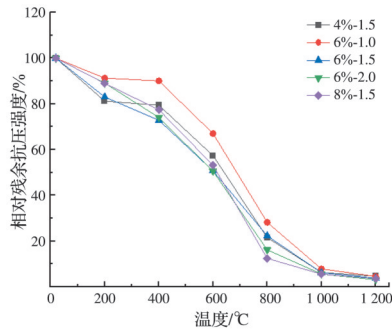
图 3 升温速率对高温后碱矿渣凝胶材料 SEM 图谱的影响
Fig. 3 Influence of heating rate on SEM images of alkali activated slag matrix after high temperatures

2.2 恒温时间的影响

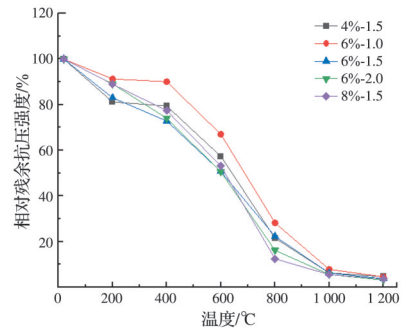
图 4 所示为恒温时间对碱矿渣混凝土高温后相对残余抗压强度的影响。从图中可以看出,恒温时间较短时混凝土残余强度始终保持在较高水平。这与恒温时间对普通混凝土的影响相同,也与傅博^[7]的研究结果基本一致。这是由于在相同升温速率条件下,随着恒温时间的延长,混凝土长时间处于高温受热环境,加剧了基体结构以及基体-骨料界面过渡区的劣化^[7, 14],使强度明显下降。从碱矿渣净浆试件的 SEM 图(图 5)也可以看出,1 200 °C 高温作用后,恒温时间较短的试件基体所受到的破坏作用也相应较小。

2.3 冷却方式的影响

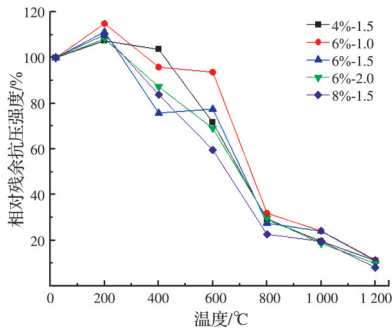
图 6 为冷却方式对碱矿渣混凝土高温后相对残余抗压强度的影响。从图中可以看出,200 °C 时,冷却方式对混凝土残余强度没有显著影响;400 °C 之后,经浇水冷却的混凝土其强度急剧下降,且始终低于自然冷却的混凝土。当温升至 1 000 °C,混凝土在浇水冷却时均发生了爆裂(见图 7),严重破坏



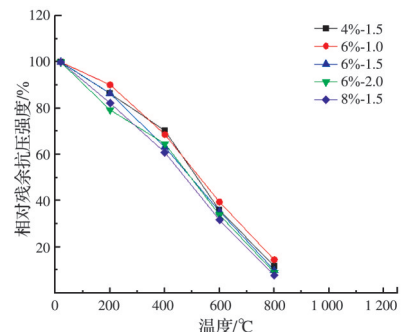
(a) 2 h



(a) 自然冷却



(b) 1 h



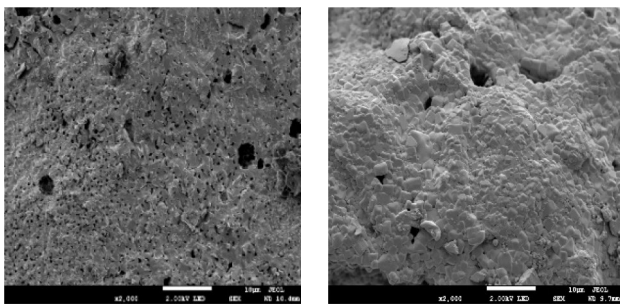
(b) 浇水冷却

图 4 恒温时间对碱矿渣混凝土高温后相对残余抗压强度的影响

Fig. 4 Influence of duration at target temperature on relative residual compressive strength of alkali activated slag concretes after high temperatures

图 6 冷却方式对高温后碱矿渣混凝土相对残余抗压强度的影响

Fig. 6 Influence of cooling method on the relative residual compressive strength of alkali activated slag concretes after high temperatures



(a) 恒温 2 h, 1 200 °C

(b) 恒温 1 h, 1 200 °C

图 5 恒温时间对高温后碱矿渣胶凝材料 SEM 图谱的影响
Fig. 5 Influence of duration at target temperature on SEM images of alkali activated slag matrix after high temperatures

试件完整性,无法测试其强度。碱矿渣胶凝材料水化产物 C-S-H(I) 凝胶通常在 600 °C 甚至更高温度下才开始逐渐分解。但有研究指出^[15],在高温后遇水的情况下,C-S-H 凝胶分解温度降低。另一方面,高温作用后的浇水冷却处理会使混凝土产生较大的温度梯度,产生热应力对混凝土造成严重损伤^[16]。受热温度越高,温度梯度则越显著。从碱矿渣净浆试件的 SEM 图(图 8)也可以看出浇水冷却对基体的破坏作用更为明显。

上述结果与普通混凝土基本一致,但需要明确



图 7 碱矿渣混凝土高温爆裂

Fig. 7 Thermal spalling of alkali activated slag concretes

的是,普通混凝土浇水冷却后的强度降低主要归咎于氢氧化钙分解再水化引起的膨胀效应以及急冷所产生的热应力^[17-19]。而碱矿渣混凝土中并无氢氧化钙水化产物,浇水后强度明显降低的主要原因,除了热应力外,则归咎于水化产物 C-S-H 凝胶遇水后在较低温度的分解。然而,上述结果与傅博^[7]前期关于碱矿渣混凝土相关影响研究的结论有所差异。但需要指出的是,前期研究中所采用的自然冷却方式为高温后打开炉门让受热试件在空气中冷却。相较于随炉自然冷却(炉门关闭),前者在一定程度上仍可视作急冷处理,因此,与同为急冷处理的浇水冷却所产生的效果差异不大。

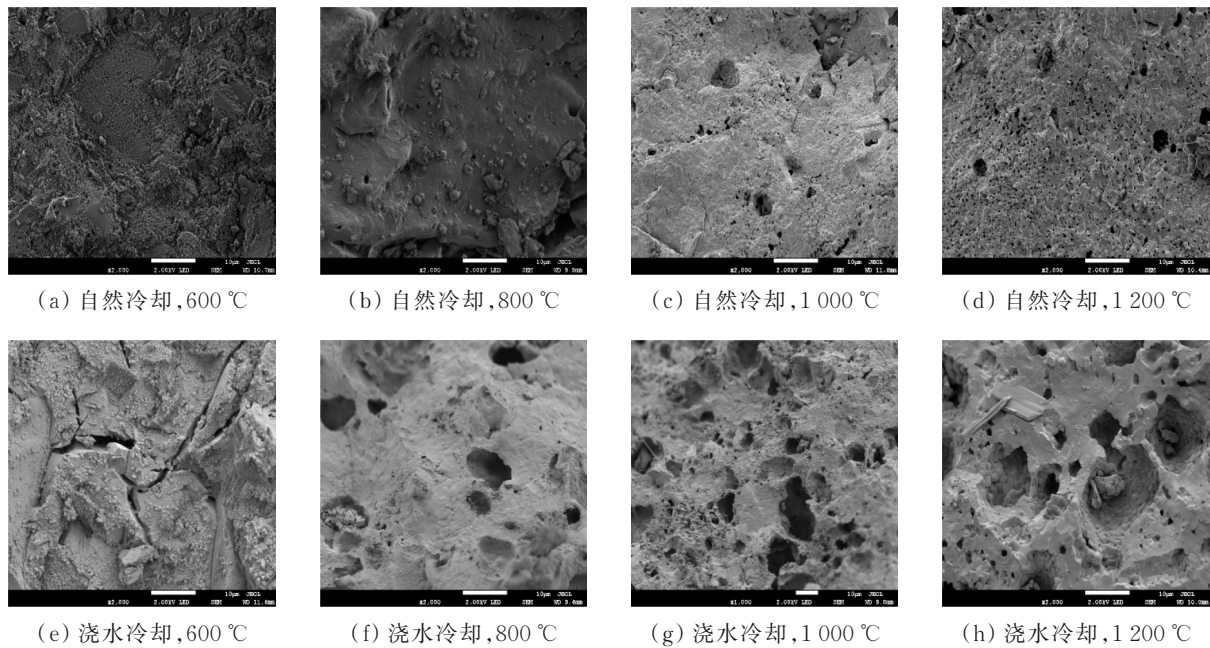


图8 冷却方式对高温后碱矿渣胶凝材料SEM图谱的影响

Fig. 8 Influence of cooling method on SEM images of alkali activated slag matrix after high temperatures

3 结论

1) 升温速率的增快可缩短碱矿渣混凝土的受热时长,但也会导致混凝土内热应力增大。当温度低于400℃时,热应力影响不明显,由于受热时长较短,混凝土残余抗压强度较高;随温度升至800℃,热应力的影响显著,相对残余抗压强度持续显著降低;800℃之后,热应力作用达到一定程度,受热时长的缩短能减缓水化产物的持续分解,使混凝土的强度保持在较高水平。

2) 恒温时间的延长会加剧碱矿渣混凝土胶凝材料基体结构及基体-骨料界面过渡区的劣化效应,从而引起混凝土残余抗压强度的降低。

3) 相较于自然冷却,浇水冷却降低了碱矿渣混凝土水化产物C-S-H凝胶的分解温度,并在混凝土内产生热应力,残余抗压强度损失明显。

参考文献

[1] 祝斌, 潘群. 碱矿渣混凝土在重庆建科大厦中的施工应用[J]. 重庆建筑, 2018, 17(8): 54-58.
ZHU B, PAN Q. Construction application of alkali-activated slag concrete in Chongqing Jianke Building [J]. Chongqing Architecture, 2018, 17(8): 54-58. (in Chinese)

[2] 碱矿渣混凝土应用技术标准: JGJ/T 439—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Technical standard for application of alkali-activated slag concrete: JGJ/T 439—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)

[3] CHOE G, KIM G, YOON M, et al. Effect of moisture migration and water vapor pressure build-up with the heating rate on concrete spalling type [J]. Cement and Concrete Research, 2019, 116: 1-10.

[4] MOHAMEDBHAII G T G. Effect of exposure time and rates of heating and cooling on residual strength of heated concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1986, 38 (136): 151-158.

[5] ZHU H, HU Y, MA R, et al. Concrete thermal failure criteria, test method, and mechanism: A review [J]. Construction and Building Materials, 2021, 283: 122762.

[6] 陈明阳, 侯晓萌, 郑文忠, 等. 混凝土高温爆裂临界温度和防爆裂纤维掺量研究综述与分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(1): 161-170.
CHEN M Y, HOU X M, ZHENG W Z, et al. Review and analysis on spalling critical temperature of concrete and fibers dosage to prevent spalling at elevated temperatures [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(1): 161-170. (in Chinese)

[7] 傅博. 碱矿渣混凝土耐高温性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 23-43.
FU B. Research on properties of alkali slag concrete subjected to elevated temperatures [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014: 23-43. (in Chinese)

[8] 李东辉, 王英, 郑文忠. 碱激发矿渣陶粒混凝土砌块高温后力学性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(6): 46-50.
LI D H, WANG Y, ZHENG W Z. Mechanical properties of alkali-activated slag ceramsite concrete block after exposure to high temperature [J]. Journal of

- Harbin Institute of Technology, 2019, 51(6): 46-50. (in Chinese)
- [9] 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(Sup2): 365-372. ZHAO D F, LIU M. Experimental study on residual strength and nondestructive testing of high strength concrete after high temperature [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(Sup2): 365-372. (in Chinese)
- [10] 资伟, 余志武, 匡亚川, 等. 受火温度和时间对喷水冷却后混凝土剩余抗压强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1545-1550. ZI W, YU Z W, KUANG Y C, et al. Influences of fire temperature and time on concrete residual compressive strength after water cooling [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(4): 1545-1550. (in Chinese)
- [11] 翟越, 艾晓芹, 邓子辰, 等. 受火温度和冷却方式对混凝土抗压强度影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(11): 74-80. ZHAI Y, AI X Q, DENG Z C, et al. Influences of cooling mode and high temperature on concrete compressive strength [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(11): 74-80. (in Chinese)
- [12] BI J, LIU P F, GAN F. Effects of the cooling treatment on the dynamic behavior of ordinary concrete exposed to high temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2020, 248: 118688.
- [13] 郑钰涛, 李玉成, 彭晨鑫. 高温后不同冷却方式对混凝土力学特性的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 189-194. ZHENG Y T, LI Y C, PENG C X. Effect of different cooling methods on mechanical properties of concrete after high temperature [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(4): 189-194. (in Chinese)
- [14] BEHFARNIA K, SHAHBAZ M. The effect of elevated temperature on the residual tensile strength and physical properties of the alkali-activated slag concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2018, 20: 442-454.
- [15] 李阳, 胡建国. 不同冷却条件混凝土显微痕迹研究[J]. 消防科学与技术, 2010, 29(4): 272-275. LI Y, HU J G. Microstructure of concrete under different cooling conditions [J]. Fire Science and Technology, 2010, 29(4): 272-275. (in Chinese)
- [16] GUPTA T, SIDDIQUE S, SHARMA R K, et al. Effect of elevated temperature and cooling regimes on mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber fiber [J]. Construction and Building Materials, 2017, 137: 35-45.
- [17] 贾福萍, 吕恒林, 崔艳莉, 等. 不同冷却方式对高温后混凝土性能退化研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(1): 25-29. JIA F P, LV H L, CUI Y L, et al. Research on degraded behaviors of research into the degraded properties of concrete specimens heated to different temperatures and then subject to various cooling methods [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(1): 25-29. (in Chinese)
- [18] ZHAI Y, LI Y, LI Y B, et al. Impact of high-temperature-water cooling damage on the mechanical properties of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 233-243.
- [19] PUL S, ATASOY A, SENTURK M, et al. Structural performance of reinforced concrete columns subjected to high-temperature and axial loading under different heating-cooling scenarios [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 42: 102477.

(编辑 胡玲)