

无机聚合物混凝土高温性能研究综述

任俊儒, 陈辉国, 杜江

(后勤工程学院 军事土木工程系, 重庆 401311)

摘要: 分别从无机聚合物胶凝体高温性能, 无机物聚合物混凝土高温劣化机理, 高温静、动力学特征, 耐火混凝土5个方面综述了目前国内外关于无机聚合物混凝土高温性能的研究进展, 指出并探索无机聚合物混凝土高温性能需要进一步深入研究的问题和今后的发展方向。

关键词: 无机聚合物; 混凝土; 高温性能; 力学性能

本文引用格式: 任俊儒, 陈辉国, 杜江. 无机聚合物混凝土高温性能研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2016(3): 138-142.

Citation format: REN Jun-ru, CHEN Hui-guo, DU Jiang. Review on Effects of Elevated Temperature on Inorganic Polymer Concrete (IPC) [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(3): 138-142.

中图分类号: TU528.01

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2016)03-0138-05

Review on Effects of Elevated Temperature on Inorganic Polymer Concrete (IPC)

REN Jun-ru, CHEN Hui-guo, DU Jiang

(Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China)

Abstract: The current works about the high temperature performance of inorganic polymer concrete (IPC) from home and abroad were summarized. The review was presented mainly concerning the thermal behavior of inorganic polymer binder, the deterioration mechanism, static and dynamic mechanical behavior of IPC subjected to elevated temperature and the researches of inorganic polymer refractory concrete. It points out some problems and outlook of the present study and provides a reference for further research.

Key words: inorganic polymer; concrete; thermal behavior; mechanical performance

无机聚合物混凝土作为一种新型快硬早强混凝土, 其胶凝材料是以高炉矿渣、粉煤灰或煅烧黏土等为基础材料, 通过碱激发作用合成的一种硅铝质胶凝材料。由于碱激发反应可以从上述基础材料中分解出 Si、Al, 使其重新聚合成具有-Si-O-Al-O-Si-或-Si-O-Si-的三维网状聚合物材料, 因此无机聚合物胶凝体与含 CSH、CH、AFm 等无机小分子的普通水泥胶凝体有着本质区别。相比于氯镁水泥、高铝水泥、磷酸盐水泥等混凝土材料, 无机聚合物混凝土在快硬、早强、节能环保、耐腐蚀、耐储备等方面表现更为优异, 并在建筑工程、固核、固废及抢修抢建等领域表现出巨大的应用前景^[1-3], 是目前国内外科学界乃至工程界的研究热点。

在高温性能方面, 由于无机聚合物胶凝体的特殊网络结构使其具有类似陶瓷的特性, 无机聚合物混凝土通常被认为比常规混凝土材料具有更好的耐火性能。现有的研究^[2]表明, 因其结构特殊, 无机聚合物混凝土不仅具有比普通混凝土更优良的工程性能, 而且其高温性能劣化机理也与普通混凝土有本质区别。目前, 对无机聚合物混凝土高温作用下强度损伤、微观变化的研究较多, 但相对于普通混凝土而言, 其在复杂应力状态和高温耦合作用下的力学特性等方面的研究仍较少。本文主要通过无机聚合物混凝土高温性能劣化机理、高温静动力学性能、耐火应用的研究现状进行综述, 指出目前该领域亟需解决的问题, 以期无机聚合物混

收稿日期: 2015-09-11; **修回日期:** 2015-09-26

基金项目: 总后基建营房部重点项目(BY211C017)

作者简介: 任俊儒(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事防灾减灾工程及新型建筑材料研究。

凝土更进一步的深入研究提供参考。

1 无机聚合物胶凝体高温性能研究

研究表明,无机聚合物混凝土高温力学性能受胶凝体高温性能影响较大^[4]。因此,为切实弄清无机聚合物混凝土的高温性能,多数研究者对其不同配方体系胶凝体的高温性能进行了研究,并取得了不少有价值的研究成果。

Kong等^[4,10]进行了粉煤灰胶凝体高温性能试验研究,研究认为高温时的聚合反应对胶凝体强度有利,粉煤灰和激发剂之比是影响强度和耐高温性能的最主要因素;其对不同尺寸粉煤灰胶凝体的高温试验研究表明,试件尺寸也是影响胶凝体高温性能的主要因素。Wang等^[5]同样对粉煤灰胶凝体进行高温试验,试验采用不同固液比,不同激发剂掺量的配合比,认为低固液比使胶凝体高温时强度更高,而激发剂掺量越多高温性能越好。Pan等^[6]分析了影响粉煤灰胶凝体高温性能的可能因素,包括激发剂阳离子种类、硅酸盐浓度、粉煤灰成分、荷载对材料软化温度和高温强度的影响,认为高温强度增长与碱激发反应放热有关。

Duxson等^[7]通过试验研究了偏高岭土胶凝体高温收缩和强度损失的原因,提出了材料的四类物理演变,认为Si:Al比值对胶凝体的温度收缩变形有重要影响。Kupwade等^[8]通过试验并采用密度方程理论、分子力学和分子动力学理论模拟研究不同Si:Al比值的胶凝体高温性能,认为Si:Al=2:1时胶凝体表现出最佳高温性能。

Kong等^[9]通过对比研究粉煤灰和偏高岭土胶凝体的高温性能,认为胶凝体内大量均匀孔隙能在高温时释放水汽,从而减小损伤。Kamseu等^[11]采用试验和理论模型评估胶凝体的有效导热性,发现基体的化学组成会影响材料的微观结构,影响热量传递规律,认为若能控制孔隙均匀则可有效增强材料绝热性能。

Pan等^[12]对粉煤灰胶凝体在高温时和高温后的应力应变曲线进行研究,发现胶凝体表现出脆性特征,在高温时会发生玻璃化转变的现象,而且材料强度在高温时不断提高,体积却先缩小后膨胀,冷却后材料强度退化严重,由此认为材料对热冲击非常敏感。Abdulkareem等^[13]对粉煤灰胶凝体高温性能进行试验研究,认为脱水和脱羟基作用是高温作用早期材料强度损伤的原因,而更高温度时未反应硅酸盐的烧结稠化过程导致了材料结构破坏。郑娟荣等^[14]对偏高岭土胶凝体在高温作用后的物相变化进行研究,分析了材料的高温脱水过程和微观状态,认为在20~800℃之间,无机聚合物胶凝体都保持无定形状态,到1000℃时三维网状结构解聚形成新的氧化物,导致强度降低。

从上述的研究可以看出,虽然影响胶凝体高温性能的因素众多,但强度退化主要取决于材料内部高温化学变化和孔隙压力。另外,虽然上述研究的无机聚合物胶凝体基础材料

不尽相同,但基本表现出一致的高温性能趋势。

2 无机聚合物混凝土高温劣化机理

普通混凝土在高温下发生性能劣化,主要原因是其中水化的硅酸盐水泥所含有大量氢氧化钙在400℃~500℃时发生水解,生成氧化钙造成初始强度损失,然后氧化钙冷却后吸水生成氢氧化钙体积膨胀,导致混凝土破坏。与普通混凝土不同,无机聚合物混凝土因为不存在游离氢氧化钙,而且其胶凝体网络结构也不同于普通水泥胶凝体。因此,无机聚合物混凝土高温破坏机理与普通混凝土截然不同。现有的研究表明,其高温性能主要取决于内部各组分的物理化学变化。

Pan等^[15-16]对无机聚合物混凝土和普通混凝土进行一系列高温试验研究认为,无机聚合物混凝土高温强度的损失不仅是因为孔隙压力和内部化学变化,还与高温时的温度变形不协调有关,具体原因在于材料内部温度分布不均匀以及材料各组分温度变形系数不匹配。研究表明,在高温环境下,虽然骨料随温度升高体积变化不大,但胶凝体的变形却经历较大的收缩,这将导致无机聚合物混凝土内部的不均匀温度变形。而且由于无机聚合物混凝土毛细孔隙率低,在高温环境中也可能发生爆裂性剥蚀,主要原因是由孔隙压力导致材料内部的物理变化,研究认为选择大粒径骨料或者掺入有机纤维,可以有效减轻或消除因上述原因引起的爆裂剥蚀问题。

王志坤等^[17]通过研究矿粉粉煤灰基无机聚合物混凝土在温度和应变率耦合作用下的抗压强度得出结论:当温度在200℃以下时,由于无机聚合物混凝土含有自由水,高温促使胶凝体中未反应的铝硅酸盐物质溶解络合和浓缩聚合,使胶凝体结构更加密实,其高温下的抗压强度较常温有所提高;当温度在200℃以上时,由于自由水蒸发,缩聚反应停止,加之水蒸汽也会导致试件胀裂产生微小缺陷,无机聚合物混凝土强度与常温时接近;在200~600℃时,无机聚合物胶凝体由于网格形式特殊,仍能被高温破坏;800℃时,骨料开始分解,导致无机聚合物混凝土强度急剧下降。

上述研究表明无机聚合物混凝土高温损伤的主要原因是孔隙压力、胶凝体化学变化、温度变形不协调。高温条件下,自由水受热蒸发产生较大的蒸汽压,在胶凝体和过渡区产生裂缝,导致材料的最初损伤;温度较低时,由于水化的加速和干燥使无机聚合物混凝土进一步强化;温度不断升高后,骨料和胶凝体表现出不协调的温度变形,导致强度严重损失;最终胶凝体在高温条件下解聚形成新的氧化物,骨料也开始膨胀破碎导致无机聚合物混凝土彻底破坏。

3 无机聚合物混凝土高温静力学性能

混凝土在高温时和高温后的抗压强度和变形能力是结

构火灾评估的关键指标,更是衡量其工程应用价值的重要参考。目前,国内外学者对无机聚合物混凝土的静力学性能进行了大量研究,如高温抗压强度影响因素、高温变形规律等。

Junaid 等^[18]对粉煤灰基无机聚合物混凝土进行了不同恒温时间高温试验研究,分析了材料强度和微观结构在持续高温下的变化,结果表明,随着恒温时间延长,高温强度逐渐稳定,认为恒温时间对材料强度有很大影响,适当的高温能促进聚合反应强化材料又不会破坏胶凝体结构造成损伤。

Kong 等^[4,19]通过对粉煤灰基无机聚合物混凝土进行的一系列高温静力试验研究,发现无机聚合物混凝土残余强度较等温处理的胶凝体大幅下降,膨胀测试表明骨料高温膨胀时胶凝体发生收缩,由此得出结论认为骨料和胶凝体温度变形不协调是造成无机聚合物混凝土强度降低的原因;通过进一步研究试件尺寸、骨料类型、骨料大小、增塑剂对粉煤灰基无机聚合物混凝土高温后残余强度的影响,表明试件尺寸和骨料大小也是影响材料高温性能的主要因素。王晴等^[20]对矿渣偏高岭土基无机聚合物混凝土进行试验研究,通过调整激发剂、偏高岭土和碱的掺量,对比分析了各组分对无机聚合物混凝土高温残余强度的影响,研究认为激发剂中水玻璃和碱的掺量对无机聚合物混凝土残余强度没有明显影响,而偏高岭土掺量影响最大,当掺量占固相 20% 时,无机聚合物混凝土残余强度最高。

许金余等^[21,22]研究了矿渣粉煤灰基无机聚合物混凝土在不同温度、不同冷却方式下的质量损失、力学、声学特性变化规律,结果表明高温会导致无机聚合物混凝土质量损失、抗压强度降低、峰值应变增大、纵波波速减小以及频谱高频成分衰减,同时冷却方式对无机聚合物混凝土的损伤演化也有显著影响,浇水冷却会对试件造成更大损伤。任韦波等^[23]还将小波包技术应用到高温后混凝土损伤检测,表明小波分析方法可以清晰地反映出不同工况下无机聚合物混凝土的声谱变化规律。

Jumppaenen 等^[24]对无机物聚合物混凝土的高温变形行为与两种硅酸盐水泥混凝土进行对比研究,结果表明 750℃ 时无机聚合物混凝土表现出比普通混凝土更大的收缩;800℃ 时,无机聚合物胶凝体表现出与普通水泥胶凝体类似的膨胀行为,认为无机聚合物混凝土热膨胀主要取决于骨料。Junaid 等^[25]对粉煤灰基无机聚合物混凝土的高温变形行为进行试验研究,试验包括恒载升温、恒温加载、无载升温三种不同工况,研究发现高温环境中无机聚合物混凝土不仅会发生与普通混凝土类似等温徐变和瞬态热徐变,体积还会经历膨胀和缩小过程。Pan 等^[15]对比研究了高温下无机聚合物胶凝体和普通水泥胶凝体的强度和瞬态徐变,研究结果表明,胶凝体的瞬态热徐变有利于无机聚合物混凝土容纳各组温度变形不协调引起的不均匀变形,有利于整体高温性能。

从上述研究成果可以看出,国内外学者通过试验研究得

出影响无机聚合物混凝土高温下和高温后静力学强度的众多因素。作为多相复合材料,无机聚合物混凝土高温静力学强度主要取决于胶凝体强度和骨料类型,此外养护、冷却方法等外在条件也有一定影响。众多的研究成果虽然能为工程应用提供参考,但却在无机聚合物混凝土高温静力学本构关系、热物理性能等重要领域仍鲜有进展。

4 无机聚合物混凝土高温动力学性能

无机聚合物混凝土具有快硬早强、耐储备等优良特性使其在军事工程、航空航天领域应用前景广阔,因此针对爆炸、战争带来的动态荷载-高温耦合作用,深入研究无机聚合物混凝土的高温动力学特性也十分必要。

目前国内仅有空军工程大学对无机聚合物混凝土高温动力性能进行了系列研究,如王志坤等^[17]通过高温下 SHPB 试验对高温-冲击耦合作用下矿渣粉煤灰基无机聚合物混凝土动态抗压强度进行了研究,在 60~130/s 应变率范围内无机聚合物混凝土呈现留芯破坏-碎裂破坏-粉碎破坏的变化规律,且破坏程度弱于常温;在 200℃ 时其动态抗压强度有所增长,后随着温度升高而下降;当应变率在 30~130/s,高温时无机聚合物混凝土的动态强度增长因子与应变率呈对数关系,温度越高应变率强化效应越明显。高志刚等^[26]研究发现动力荷载下无机聚合物混凝土的吸能能力与其强度和变形能力有关,且与应变率和冲击压缩强度呈线性关系。由于高温条件下无机聚合物混凝土内部的物理化学变化,200℃,600℃ 时试件吸能特性较常温分别可提高 30% 和 56%,而 400℃,800℃ 时吸能能力较常温时有所下降。许金余等^[27]对比研究了玄武岩纤维和碳纤维对无机聚合物混凝土动力性能的改进效果,认为碳纤维的掺量为 0.2% 时效果最好。

上述研究对无机聚合物混凝土的高温动力性能进行了初步探索,得到材料动态破坏规律、影响因素、改性方法等成果,其研究为无机聚合物混凝土在特种领域的应用奠定了基础,但研究还处于起步阶段,还可以在无机聚合物混凝土高温抗侵彻性能、高温动力本构关系等方面深入研究。

5 无机聚合物耐火混凝土

无机聚合物胶凝体因其网络结构具有常用耐火材料优点,已被用于研制钢结构,隧道衬砌等结构的耐火涂层^[28,29]。现有的研究在胶凝体中加入各种轻集料,以期配制出适用于火箭导流槽、窑炉衬砌层的新型耐火混凝土,为无机聚合物混凝土材料的应用开启了新思路。

Abdulkareem 等^[13]在粉煤灰胶凝体中加入膨胀粘土制成了轻集料耐火混凝土,高温试验研究发现由于集料均匀多孔的特点,耐火混凝土在高温时传热更慢,高温后残余强度

损失较小。丁庆军等^[30]以陶砂为集料制成偏高岭土基无机聚合物耐火混凝土,测试并分析了其28d强度、950℃高温后强度损失率和界面结构变化,认为通过调节陶砂掺量可以使这种新型混凝土具有良好的力学性能和耐高温性能。胡曙光等^[31]研究了陶砂的粒径和相对无机聚合物质量比对无机聚合物混凝土的力学性能和耐火性能的影响,研究认为集料表面胶凝体厚度影响最大,提出陶粒最佳粒径为1.18~4.75 mm,集料单位面积上胶凝体最好控制在0.3~0.5 mg/mm²。Zuda等^[32]采用蛭石和电石作为耐火混凝土集料也取得理想耐火效果,蛭石能够增加无机聚合物混凝土的孔隙率并且能通过表面的空隙使胶凝体和集料紧密结合,从而增强其高温条件下网络结构的稳定性;电石在高温条件下变形小,并且在1200℃时于碱环境中熔化和铝硅酸盐分解物继续反应生成类似陶瓷连接,使无机聚合物混凝土强度更为稳定,甚至比常温有所提高。

现有的研究表明耐火无机聚合物混凝土强度损失的主要原因是胶凝体脱水和各组分膨胀不协调,因此集料的选择尤为重要,集料的微观结构要适应强度和耐火要求,还要具有与胶凝体相近的温度变形性能。

6 展望

从综述内容可以看出,国内外对无机聚合物混凝土高温性能研究已取得一定成果,但是作为一种具有明显特点的新型工程材料,相比于普通混凝土,现有的研究仍不足以全面阐释无机聚合物混凝土的高温特性,还存在许多有待解决的问题。

1) 无机聚合物混凝土胶凝材料种类很多,高温性能受原材料影响巨大。现有研究缺乏针对性、系统性,有必要结合应用实际,针对某些具有明显耐高温优势无机聚合物混凝土进行系统研究,并编制相应的配合比规范和统一试验标准。

2) 影响无机聚合物混凝土高温性能的因素众多,且与普通混凝土有所不同,不仅有必要借鉴普通混凝土的研究思路,开展热物理性能、本构关系等方面研究,还需要侧重于无机聚合物混凝土的独特性能进行研究,比如碱激发反应过程、胶凝体网络结构、胶凝体高温收缩变形等。

3) 目前无机聚合物混凝土高温性能的研究主要集中在材料力学和微观结构,而在结构层面无机聚合物混凝土多处于复杂应力状态,其高温性能必定发生较大变化,因此有必要系统研究无机聚合物混凝土构件、结构的高温性能。

4) 混凝土结构构件承载的基础来自于钢筋和混凝土的共同工作,其粘结性能的高温劣化也是影响结构构件高温力学性能的重要因素,有必要系统研究无机聚合物混凝土高温粘结性能退化规律和影响因素。

参考文献:

- [1] 史才军,克利文科,罗伊,等. 碱-激发水泥和混凝土: Alkali-activated cements and concretes[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [2] 张书政, 龚克成. 地聚合物[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(3): 430-436.
- [3] DAVIDOVITS J. 30 years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs[C]//Keynote Conference on Geopolymer Conference. [S. l.]: [s. n.], 2002.
- [4] KONG D L Y, SANJAYAN J G. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures [J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(10): 986-991.
- [5] WANG W C, WANG H Y, LO M H. The engineering properties of alkali-activated slag pastes exposed to high temperatures [J]. Construction & Building Materials, 2014, 68(15): 409-415.
- [6] PAN Z, SANJAYAN J G. Factors influencing softening temperature and hot-strength of geopolymers [J]. Cement & Concrete Composites, 2012, 34(2): 261-264.
- [7] DUXSON P, LUKEY G C, DEVENTER J S J V. Physical evolution of Na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000 °C [J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(9): 3044-3054(11).
- [8] KUPWADE K. Multi-scale modeling and experimental investigations of geopolymeric gels at elevated temperatures [J]. Computers & Structures, 2013, 122(6): 164-177.
- [9] KONG D L Y, SANJAYAN J G, SAGOE-CRENTSIL K. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures[J]. Cement & Concrete Research, 2007, 37(12): 1583-1589.
- [10] KONG D L Y, SANJAYAN J G. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete [J]. Cement and concrete research, 2010, 40(2): 334-339.
- [11] KAMSEU E, NAIT-ALI B, BIGNOZZI M C, et al. Bulk composition and microstructure dependence of effective thermal conductivity of porous inorganic polymer cements [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2012, 32(8): 1593-1603.
- [12] PAN, ZHU, SANJAYAN, et al. Stress-strain behaviour and abrupt loss of stiffness of geopolymer at elevated temperatures [J]. Cement & Concrete Composites, 2010, 32(9): 657-664.

- [13] ABDULKAREEM O A, MUSTAFA AL BAKRI A M, KAMARUDIN H, et al. Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete [J]. Construction & Building Materials, 2014, 50(2): 377-387.
- [14] 郑娟荣, 刘丽娜. 地质聚合物在高温作用后物相变化的研究 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2008, 28(3): 5-8.
- [15] PAN Z, SANJAYAN J G, COLLINS F. Effect of transient creep on compressive strength of geopolymer concrete for elevated temperature exposure [J]. Cement and Concrete Research, 2014(56): 182-189.
- [16] PAN Z, SANJAYAN J G, KONG D L Y. Effect of aggregate size on spalling of geopolymer and Portland cement concretes subjected to elevated temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2012(36): 365-372.
- [17] 王志坤, 许金余, 范建设, 等. 温度、应变率对地质聚合物混凝土抗压强度的影响 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(17): 197-202.
- [18] JUNAID M T, KHENNANE A, KAYALI O. Investigation into the Effect of the Duration of Exposure on the Behaviour of GPC at Elevated Temperatures [C]//MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2014(11): 01003.
- [19] KONG D L Y, SANJAYAN J G, SAGOE-CRENTSIL K. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(12): 1583-1589.
- [20] 王晴, 刘磊, 吴昌鹏. 高温作用下无机矿物聚合物混凝土的力学性能研究 [J]. 混凝土, 2007(3): 69-71.
- [21] 许金余, 任韦波, 刘志群, 等. 高温后地质聚合物混凝土损伤特性试验 [J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2013, 14(3): 265-270.
- [22] 朱靖塞, 许金余, 罗鑫. 地质聚合物混凝土的高温损伤特性研究 [J]. 混凝土, 2014(8): 8-10.
- [23] 任韦波, 许金余, 张泽扬, 等. 高温后地质聚合物混凝土声谱特性的小波包分析 [J]. 建筑材料学报, 2014, 17(2): 284-290.
- [24] JUMPPAENEN U M, DIETRICH U, HINRICHSMAYER K. Materials properties of concrete at high temperatures [R]. VTT Research Report 452, Technical Research Centre of Finland (VTT), 1986, Finland.
- [25] JUNAID M T, KHENNANE A, KAYALI O, et al. Aspects of the deformational behaviour of alkali activated fly ash concrete at elevated temperatures [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 60: 24-29.
- [26] 高志刚, 许金余, 白二雷. 温度对地质聚合物混凝土吸能特性的影响研究 [J]. 混凝土, 2013(3): 10-13, 17.
- [27] 许金余, 李为民, 杨进勇, 等. 纤维增强地质聚合物混凝土的动态力学性能 [J]. 土木工程学报, 2010(2): 127-132.
- [28] SAKKAS K, NOMIKOS P, SOFIANOS A, et al. Utilisation of FeNi-Slag for the Production of Inorganic Polymeric Materials for Construction or for Passive Fire Protection [J]. Waste and Biomass Valorization, 2014, 5(3): 403-410.
- [29] SAKKAS K, PANIAS D, NOMIKOS P P, et al. Potassium based geopolymer for passive fire protection of concrete tunnels linings [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2014, 43(7): 148-156.
- [30] 丁庆军, 吴静, 吕林女, 等. 新型地聚合物基轻质耐高温混凝土的研究 [J]. 混凝土, 2007(3): 1-3.
- [31] HU S, WU J, YANG W, et al. Preparation and properties of geopolymer-lightweight aggregate refractory concrete [J]. Journal of Central South University of Technology, 2009(16): 914-918.
- [32] ZUDA L, DRCHALOV J, ROVNAV K P, et al. Alkali-activated aluminosilicate composite with heat-resistant lightweight aggregates exposed to high temperatures: mechanical and water transport properties [J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(2): 157-163.

(责任编辑 杨继森)