

碱激发胶凝材料发展瓶颈在哪里

阎培渝

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 碱激发胶凝材料被认为是绿色环保的低碳胶凝材料。虽然已有近百年历史, 但迄今并未大规模生产与应用。通过分析最近 3 次国际水泥化学会议的相关主题报告的内容, 发现现在碱激发胶凝材料的研究集中于材料组成、微结构和性能等方面, 缺乏结构工程层面的研究。这阻碍了碱激发胶凝材料的技术标准和设计规范的制订, 不能规模化生产碱激发胶凝材料, 使得碱激发胶凝材料的推广应用遇到很大困难。

关键词: 碱激发胶凝材料; 应用研究; 建筑结构; 发展瓶颈

中图分类号: TQ175 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)08-2067-03

网络出版时间: 2022-07-01



What is the Development Bottleneck of Alkali-Activated Binder

YAN Peiyu

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Alkali-activated binder is considered as one of green environmental low-carbon cementitious materials. However, this binder has not been produced commercially and used widely in civil engineering so far. Based on the analysis on the keynote reports on alkali-activated binder in International Conferences on Cement Chemistry, recent work on alkali-activated binder focus on its composition, microstructure of hardened paste and properties. There is a lack of work on building elements and structure made with this binder. This issue hinders the establishment of technical standard system of alkali-activated binder and related design norm of building structure. This could result in a great barrier of the commercial production of alkali-activated binder. As a result, it is rather difficult to enhance the application of alkali-activated binder.

Keywords: alkali-activated binder; application study; building structure; development bottleneck

碱激发胶凝材料是以具有火山灰性或潜在水硬性的非晶态铝硅酸盐材料为主要原料, 与碱性激发剂发生化学反应, 得到的一种水硬性胶凝材料。与硅酸盐水泥相比, 碱激发胶凝材料具有能耗低、强度高、耐久性好等特点, 被认为是一种绿色低碳胶凝材料^[1]。这种胶凝材料已有数 10 年历史。经过早期的探索性试验后, 前苏联的 Glukhovsky 在 20 世纪 50 年代研发出了可实际使用的碱激发胶凝材料, 称为“土壤水泥”^[2]。此后, 许多科学家对此类胶凝材料进行了广泛的研究, 其中影响较大的是法国的 Davidovits 所研发的地质聚合物水泥

“Geopolymer”^[3-5]。他曾使用了许多商标来命名所发明的 Geopolymer, 如 Pyrament, Geopolycem 和 Geopolymite 等。目前地质聚合物水泥已成为碱激发胶凝材料的另一个名称而被广泛使用。在中国知网上以“地质聚合物”为主题词, 可以检索到 900 余篇文献, 而以“碱激发胶凝材料”为主题词, 只能检索到 450 篇文献。2 个主题词检索到的文献很多是重合的。碱激发胶凝材料与地质聚合物的原材料、反应机理和反应产物都是相同的, 二者所用的原料也从最初的亚高岭土扩展到所有的非晶态铝硅酸盐材料。有人甚至尝试使用晶态的硅铝质固

收稿日期: 2022-02-21。 修订日期: 2022-03-02。

第一作者: 阎培渝(1955—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-02-21. Revised date: 2022-03-02.

First author: YAN Peiyu (1955—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: yanpy@tsinghua.edu.cn

体工业废渣作为原料, 制备碱激发胶凝材料(地质聚合物)。

在 20 世纪后半叶, 碱激发胶凝材料不是一个研究热点, 相关成果不多。但自 20 世纪末以来, 由于减小温室效应的需求, 碱激发胶凝材料的研究在世界各地急剧增加, 成为水泥混凝土领域的研究热点。在 Web of Science 数据库利用 Alkali-activated Binder 为主题词进行检索, 从 2000 年初到 2021 年底, 共有 4 738 篇文献, 其中 2016 年以后有 2 925 篇, 占 62%。水泥混凝土研究领域最重要的学术会议“International Conference on Cement Chemistry”从 2011 年第 13 届开始, 安排碱激发胶凝材料的大会主题报告, 总结 2 次会议期间, 4 年内的研究进展。由此可见对于碱激发胶凝材料的关注持续增长, 发表的论文数量呈指数增长。

碱激发胶凝材料发明以后, 在前苏联得到过实际应用, 制备了约 300 万 m^3 的混凝土, 生产了铁路轨枕和建筑砌块等; 建设了一些高层和普通住宅楼, 以及仓库、水池、道路等^[6]。但碱激发胶凝材料的生产和应用并没有持续下去, 很快就停止了。这些建(构)筑物的设计方法也没有传承下来。进入本世纪, 在中国和澳大利亚, 再次开展了碱激发胶凝材料商业化生产的尝试, 用于钢筋混凝土结构、制备建筑砌块和加固不良土体等^[7]; 也用于道路基层材料^[8]。在澳大利亚布里斯班市, 使用碱激发胶凝材料修建了一条飞机跑道^[9]; 也用于码头盖板的连接材料^[10]。这些工程案例所需要了解的材料性能与普通的建筑物设计所需要的材料性能并不相同。

碱激发胶凝材料已发明了数十年, 研究热情也很高, 已掌握了其反应机理, 了解其基本性能发展规律。虽然这种材料被认为是一种绿色环保材料, 但是却一直不能推广, 大规模应用, 迄今只有少量示范性工程案例, 未见工业化的材料生产与规模化的实际工程应用。阻碍碱激发胶凝材料的实际应用的瓶颈是什么?

国际材料与结构研究实验室联合会(RILEM)于 2006 年成立了碱激发材料技术委员会(TC-224-AAM), 在 2014 年发表了最终技术报告, 全面总结了碱激发胶凝材料的研究与应用现状, 并展望了发展前景^[11]。报告列举了阻碍碱激发胶凝材料广泛应用的 6 个因素: 1) 硅酸盐水泥的原料丰富易得, 碱激发胶凝材料的原料来源受限; 2) 碱激发胶凝材料缺乏适应性良好的外加剂; 3) 硅酸盐水泥历史悠久, 碱激发胶凝材料的应用案例少; 4) 混

土标准均以硅酸盐水泥为依托, 碱激发胶凝材料的使用不符合现行混凝土标准; 5) 碱激发胶凝材料的耐久性测试方法和标准缺乏; 6) 使用硅酸盐水泥制备的混凝土结构设计准则所依据的混凝土微观结构行为假设不适用于碱激发胶凝材料配制的混凝土。总之, 推动碱激发胶凝材料的发展与应用需要关注碱激发胶凝材料配制的混凝土的耐久性及其测试方法、结构性能和设计规范。

13 届到 15 届 International Conference on Cement Chemistry 上连续发表了 3 篇关于碱激发胶凝材料的大会主题报告。第 13 届会议发表的“New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement”^[12], 主要介绍了碱激发胶凝材料的分类和反应机理。第 14 届会议发表的“Advances in understanding alkali-activated materials”^[13], 主要介绍了碱激发胶凝材料反应产物的微结构表征和表征模型; 碱激发胶凝材料所用的原材料品种; 碱激发胶凝材料的耐久性及其试验方法, 包括氯离子传输与固化, 碳化, 硫酸盐侵蚀和酸侵蚀, 碱骨料反应; 耐久性预测。第 15 届会议发表的“Recent progress in low-carbon binders”^[14], 主要介绍了碱激发胶凝材料的组成, 包括固体原材料和激发剂; 新拌碱激发胶凝材料浆体的流变行为; 碱激发胶凝材料所用的化学外加剂; 碱激发胶凝材料的凝结时间; 碱激发胶凝材料的微结构表征方法和模型; 碱激发胶凝材料的微结构和力学性能, 体积稳定性和耐久性; 文章还介绍了单组分的碱激发胶凝材料。对于碱激发胶凝材料的应用, 则只有一些探索性案例, 如陶粒、危险废物固化等, 未见用于混凝土建筑结构的案例。由此可见, 碱激发胶凝材料的研究仍然集中于材料的组成、反应机理和性能表征等方面, 即仍在材料科学的领域中。在 Web of Science 检索出的 4 837 篇相关文献中, 90%以上是材料研究论文。发表相关论文最多的前 10 名杂志(发表相关文章数量占总数的 40%)全部属于材料科学领域。研究碱激发材料制备的混凝土构件的性能的文章寥寥无几, 整体建筑结构的性能几乎无人研究。

由于碱激发胶凝材料所用原材料来源广泛, 性能差异很大, 品质波动也大, 导致碱激发胶凝材料的制备工艺变化多端, 性能变化很大, 难于规范, 产品质量稳定性控制难度大。迄今没有碱激发胶凝材料的技术标准颁布, 也未见有人尝试编制相关标准。没有材料标准, 无法对碱激发胶凝材料的品质进行评价, 其生产没有依据, 产品无法验收, 就不

可能组织工业化生产。材料不能批量生产,应用就无从谈起。

使用碱激发胶凝材料修建结构物,必须首先了解碱激发胶凝材料制备的建筑构件性能,通过构件试验和整体结构试验,确定结构设计参数,结构工程师才能进行建筑结构设计,并实际建造。另外还需要了解碱激发胶凝材料配制的混凝土的施工性能,从而制订可行的施工方案,保证结构施工顺利进行。碱激发胶凝材料配制的混凝土的构件性能和施工性能的研究目前基本缺失。这类研究不可能依靠材料科学领域的小尺寸试验进行,必须进行足尺模型试验或现场试验。这需要有工业化生产的碱激发胶凝材料供应,目前未见有建筑材料公司进行碱激发胶凝材料的大批量生产。

RILEM TC-224-AAM 委员会的总结报告^[11]中提及的 6 个阻碍碱激发胶凝材料发展的障碍目前并没有被克服。如果没有碱激发胶凝材料的工业化生产;没有结构工程师的参与,开展结构工程研究并编制相关的材料标准和设计、施工规范,碱激发胶凝材料就不可能顺利发展,也不可能应用于实际建筑工程中。

参考文献:

- [1] 史才军, 克利文科, 罗伊. 碱-激发水泥和混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 9.
- [2] GLUKHOVSKY V D. Gruntosilikaty (Soil Silicates). Gosstroyizdat[M]. Kiev, 1959.
- [3] DAVIDOVITS J. Mineral polymers and methods of making them[P]. US Patent 4349386. 1982.
- [4] DAVIDOVITS J. Synthetic Mineral Polymer Compound of the Silicoaluminates[P]. Family and Preparation Process. US Patent 4472199, 1984.
- [5] DAVIDOVITS J. Geopolymers - inorganic polymeric new materials[J]. J Thermal Anal, 1991, 37(8): 1633-1656.
- [6] 蒲心诚. 碱矿渣水泥与混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 4.
- [7] 章定文, 王安辉. 地聚合物胶凝材料性能及工程应用研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5): 13-38.
ZHANG Dingwen, WANG Anhui. J Archit Civ Eng (in Chinese), 2020, 37(5): 13-38.
- [8] 郭一枝, 万暑, 吴超凡. 碱激发废旧混凝土道路基层材料在马桥河路改建工程中的应用[J]. 中外公路, 2019, 39(5): 266-271.
GUO Yizhi, WAN Shu, WU Chaofan. Chin Foreign Highway(in Chinese), 2019, 39(5): 266-271.
- [9] GLASBY T, DAY J, GENRICH R, et al. EFC geopolymers concrete aircraft pavements at Brisbane West Wellcamp Airport[A]. Concrete 2015: 27th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia in Conjunction With the 69th RILEM Week, 1051-1059. Melbourne, Australia 2015.
- [10] GLASBY T, DAY J, KEMP M, et al. The use of geopolymers concrete and GFRP materials for an innovative wharf structure[A]. Proceedings for the 2018 fib Congress: Better, Smarter, Stronger, 2733-2750. Melbourne, Australia, 2018.
- [11] PROVIS J, VAN DEVENTER J. 碱激发材料[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2019: 1.
- [12] SHI C, JIMÉNEZ A F, PALOMO A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement[J]. Cem Concr Res, 2011, 41: 750-763.
- [13] PROVIS J, PALOMO A, SHI C. Advances in understanding alkali-activated materials[J]. Cem Concr Res, 2015, 78: 110-125.
- [14] SHI C, QU B, PROVIS J. Recent progress in low-carbon binders[J]. Cem Concr Res, 2019, 122: 227-250.