

Views & Comments

建筑脱碳——碱激发材料能作何贡献？

John L. Provis^{a,b}, Susan A. Bernal^c, 张祖华^d^a Department of Materials Science and Engineering, University of Sheffield, Sheffield S1 3JD, UK^b Paul Scherrer Institut, Villigen PSI 5232, Switzerland^c School of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK^d School of Materials Sciences and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China

1. 引言和背景

目前，建筑脱碳问题在全球范围内备受关注，也一跃成为工程界和相关工业部门的首要任务[1]。建筑材料在生产和使用过程中的碳排放是构成建筑环境总体排放足迹的主要因素之一，因此该过程也是实现脱碳的基础。在全球建筑材料行业中，水泥和混凝土行业的碳排放量高居榜首，因此，探讨它们如何实现快速深度脱碳的目标对于尽量减少对地球及其生态系统造成不可逆转的损害具有重要意义。

本文对硅酸盐水泥和混凝土脱碳相关内容将不做详究，这类主题在近期的重要评论[2–3]以及众多发展路线（包括全球范围[4–5]多个其他国家及地区）中已做详尽阐述。值得注意的是，人们在引入何种脱碳实现技术上，优先选择何种技术，或如何实现跨部门最佳投入以推动转型时，存在明显偏差，而这些偏差并非均由技术原因导致。在面临此类战略和技术方面的挑战或机遇时，地理、经济和社会因素往往被忽视，而这些实际上是促进技术方案广泛应用的主要因素。

水泥和混凝土建筑行业的碳排放足迹非常高，这与相应材料的超高使用量密切相关，据统计，全球每年混凝土的消费量为140亿吨，其中水泥消耗量为42亿吨[4]。尽管混凝土的单位质量（或体积）排放足迹远低于许多其他工程材料，即使考虑到机械性能的调整[6]，巨大的生产

量也使其在全球排放以及其他环境影响方面的贡献高得令人难以置信。不过这也为改善水泥和混凝土环境状况提供了重要的研发动力，即使每吨材料的碳排放量稍有改善，一经广泛推广实施，也可能大大降低全球大气污染物排放水平[7]。

这种可能性引出了本文的核心目的，即介绍和讨论一种可广泛实施的途径，以减少全球水泥和混凝土行业的碳排放量：碱激发技术。该技术作为生产低碳水泥的途径，不仅可以实现不同行业废料和副产品价值化，还能实现安全管理。本文并非认为碱激发是唯一可实现上述目的的途径——事实恰恰相反，要实现建筑材料的深度快速脱碳需要一种“工具箱”式的解决方法，必须因地制宜，广泛采用多种材料来应对该类复杂问题[8]。碱激发技术并非万金油，不具备普适性，而是作为一种有利于实现水泥生产[9]、混凝土技术[10]以及结构设计[11]领域多种创新研发的工具包，这些创新有助于建筑材料行业实现脱碳[2]。

2. 碱激发可促进水泥和混凝土行业实现脱碳

如图1所示，碱激发的基本原理是，通过将中等活性的硅铝酸盐粉体与水性（或速溶）碱源结合，加速（“激发”）硅铝酸盐粉体向固体胶凝材料的转变[12]。高pH环境加速硅铝酸盐的溶解，该化学反应过程通常称为“溶

解-聚合-沉淀”，进而形成一种具有强度的碱-硅铝酸结合相[13]。该反应也可通过将硅铝酸盐粉体与固体碱源混合后加水，即所谓的“单组分”碱激发来实现[14]。

在许多方面，碱激发可被视为波特兰水泥与辅助胶凝材料混合概念的延伸，因为碱激发水泥中使用的硅铝酸盐粉体与波特兰水泥中使用的硅铝酸盐粉体基本相同：冶金炉渣、粉煤灰以及越来越多的天然以及人工辅助凝胶材料[15-17]。但逆向看待这个问题可能价值更大。为了减少碳排放足迹，在混合水泥的研发中通常会集中关注这样一个问题，“我可以在波特兰水泥中掺入多少辅助胶凝材料，同时还能保证水泥必要的性能？”但波特兰水泥作为胶凝材料的必要组成部分这一假设被碱激发胶凝材料的开发打破。相反，人们应该关注的问题是：“怎样才能最有效地将这种硅铝酸盐粉体转化为符合要求的水泥？”这便为不同硅酸盐（和其他）粉末、碱源（激发剂）以及其他外加剂之间更加多样化的混合方案开辟了道路。简而言之，只要摆脱“水泥”一词隐含的“波特兰水泥”这一假设，就能在材料设计中获得许多自由度，进而实现高效以及高性能的目的。当然，波特兰水泥很有可能作为碱激发胶凝材料中的有用成分，生成通常所说的“混合”碱性激发剂[18-19]，尤其是在现有的硅铝酸盐粉体早期强度无法实现的情况下。

在许多国家，碱激发胶凝材料可以而且已经用于混凝土的工业规模生产，用于基础设施、住宅和商业建筑以及混凝土构件（如砌块、铺路砖以及管道）的建设。Rossi等[20]对这些材料作为商业化碱激发材料的实际应用进行了最新概述。如上所述，由于材料和配方的多样性，碱激发混凝土的标准化必须以性能为基准，依据材料的性能而非材质来进行描述[21]。这种方法已在英国取得成果，英国标准协会（British Standards Institute）发布了基于该类材料性能的规范[22]。各种终端用户和资产所有者也已在指定应用中引入了自己的碱激发混凝土的定制规范，其中澳大利亚的州公路局是最早的执行人之一[23]，且多个国家也已开始着手制定国家标准。国际建筑材料、系统以及结构实验室与专家联盟（RILEM）及其技术委员会也对这些标准性能基础的耐久性试验进行了分析[24-26]，该领域的进一步工作正在进行中。

这些测试和验证活动已非常清楚地表明，要成功地完成基于性能的设计和规范，就必须深入了解胶凝材料和混凝土的材料科学基础，因为我们需要对测试方法进行选择和调整，以适应当前材料的化学性质和微观结构。在碱激发材料方面，工程试验和科学基础之间的合作关系已相对成熟。但与波特兰水泥基材料一样，即使在对胶凝材料进行概念上的简单测试，其所测的物理和化学现象也较为复

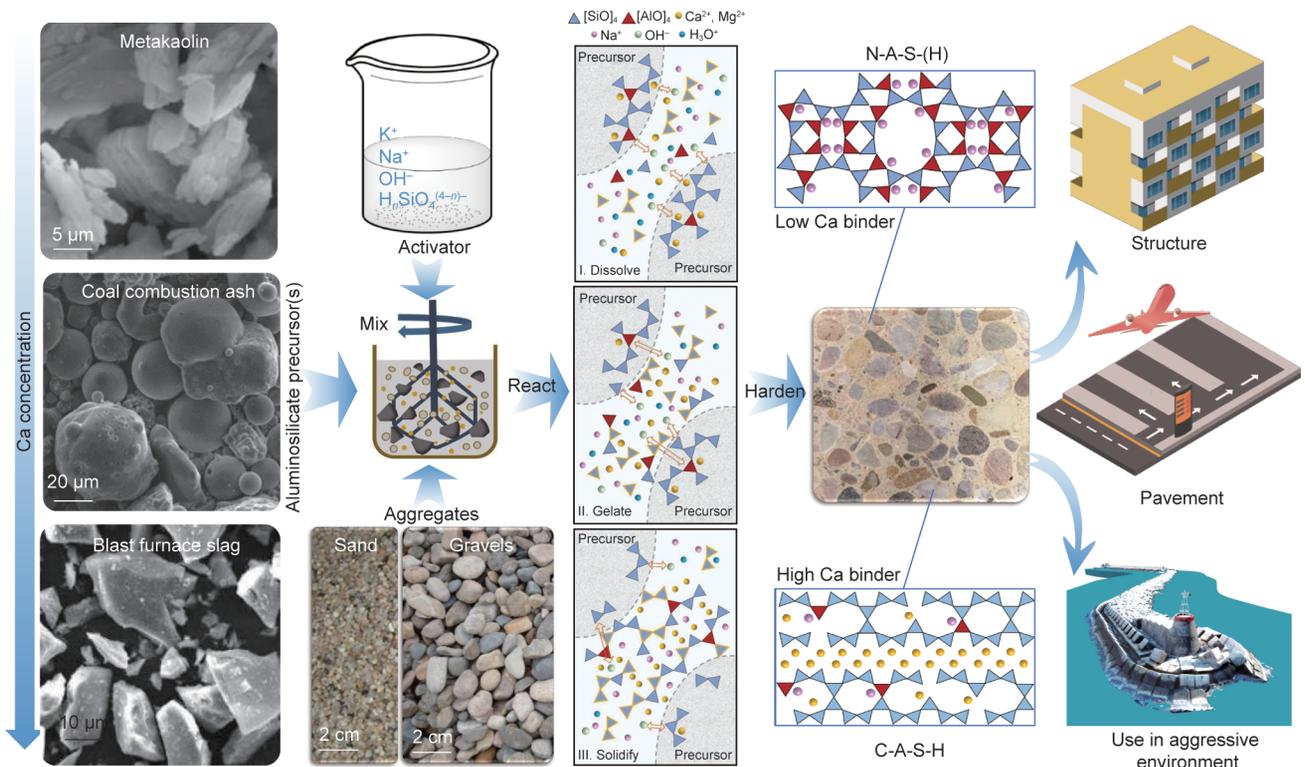


图1. 从前驱体到应用的碱激发材料。N-A-S-(H)代表铝硅酸钠型反应产物，而C-A-S-H代表含钙和铝的硅酸盐类水化产物。

杂，这也就意味着需要进一步基于材料开展研究。尤其需要对碱激发胶凝材料对其凝结硬化环境的敏感性进行更好的分析和了解，而且必须对如自收缩等因素进行更有效的控制[27]。

要使这些材料（或其他类别的新型水泥和混凝土材料）达到其所能提供的减排效果，就必须对这些碱活性材料进行验证，并对其耐久性进行测试。如果不能充分对使用寿命或耐久性进行预测，不能让规范制定者确信材料能够在必要的时间范围内达到预期目的，那么这种材料便不能投入使用。事实上，不仅要考虑化学耐久性，还要对力学载荷、热变化、湿度变化、尺寸稳定性以及其他方面的长期表现进行考虑。如果无法完全确定耐久性达标，那么材料或结构的设计可能会超出规格[在性能和（或）尺寸上]，从而影响减排目标的实现。因此，如果要实现任何新建筑材料潜在减排，就必须有经过验证的试验方法和材料设计方案。就碱激发材料而言，事实证明，为波特兰水泥制定的现有耐久性试验标准，通常与这些材料在自然暴露条件下进行测试所能确定的结果相似度有限[28]。碳化就是一个很好的例子，它通常被视为碱激发材料的“致命弱点”。在自然碳化条件下测试碱激发材料的性能时，可以发现与现代基础设施中常用的混合波特兰水泥材料相比，碱激发胶凝材料具有相当或更优越的抗碳化性[29]；而与加速试验常得出的令人沮丧的结果相比，结果截然不同。

对于将新材料引入较大规模工程，必须考虑到新的建筑材料的应用可能引发（真实的或认识到的）的风险，进行有选择地应用，这同样重要。这方面有时很难达到一种平衡。那些附加值较高的应用领域往往需要承担较高责任，因此那些可以接受新材料的应用成本可能比既定方案略高。对低风险应用中的一些性能进行证明，也不一定能达到高要求建筑结构对材料的要求。然而，在较低风险的应用中使用尚未达到规模效应的新材料进行生产或验证质量时，必须跨越成本和选择障碍，因为在这些应用中，通常都会选择成本最低的解决方案（一般来说都是最“传统”的解决方案）。这进一步强调了在计算项目成本和其中使用的材料成本时，要准确且全面地计算碳排放成本，无论通过正式的碳价格体现，亦或通过其他机制体现。

即使不考虑碳定价因素，在特定情况下，将从工业废料或副产品原材料与廉价的碱激发剂相结合获得碱激发胶凝材料可能是最具成本效益的解决方案。但利用废料生产低成本材料的经济性也存在更多考量因素：一旦废料生产者意识到废料对潜在最终用户的价值，这些废料就可能不

再被视为“废料”，而可能摇身一变成为以较高成本出售的“副产品”（是否愿意为此买单取决于最终用户）。这种情况下，“副产品”生产过程中产生的部分二氧化碳（CO₂）以及其他排放物就必须纳入排放量范畴。在许多司法管辖区，高炉矿渣已被列为该类情况[30]，这种材料已经从废料变为产品，因为经营高炉（和相关造粒设施）的钢铁生产商将矿渣作为有利可图的副产品，因此必须将其重新分配为非零排放产品。工业废料或副产品的排放分配是一个复杂而微妙的问题，重要的国家的、社会的和司法的影响力都会对其产生影响，需要专家进行进一步分析，而非本文所能涵盖[31]。然而在讨论从废弃硅铝酸盐粉体中产生碱激发胶凝材料时，这也是一个重要的考量因素。在考虑整个生命周期和循环潜力时，这种分析会更复杂，因为耐久性和结构完整性在混凝土设计中起着关键作用，尤其是在为达到某种性能目的而必须使用某种类型和数量的波特兰水泥的情况下。现有的标准化方法将使用环境条件进行了暴露等级划分，并对相应的混凝土配方进行了规定，但这种方法不太可能直接用于以碱激发胶凝材料为胶结料的情况，因为在暴露于不同环境时，它们的性能与波特兰水泥不同。因此需要制定一套相应准则，确保这些材料在可持续性、优化的力学性能以及寿命等方面都被合理利用。

3. 结论

显而易见，全球建筑行业内进行脱碳化势在必行，该行业对人类福祉和社会发展至关重要，它为全球数十亿人提供了体面的生活、安全用水、食品供应，以及更健康舒适的生活方式。因此，该行业的绿色转型必须得到政策制定者、监管机构和其他方面的支持，从而保证材料及其他技术的研发和部署，以实现必要的改进。整个供应链的从业人员和其他利益关联者也需尽力推进这些拥有巨大潜力技术的采用，以实现行业向更可持续发展的方向过渡。这需要一个能够提供可持续材料的工具包，包括作为重要成分的碱激发水泥和混凝土，以及用于基础设施材料的其他创新型水泥和非水泥生产的解决方案。对材料特性及其在不同形式的物理、化学和机械载荷下的稳定性进行长期验证至关重要，但必须辅之以科学的加速测试，这样新材料就不需要几十年或更长的时间才能投入使用。必须在材料和工程层面对新材料进行测试和验证，必须在其供应链、性能、耐久性和生命周期排放足迹方面树立足够的信心，使其能够充分发挥潜力，造福全球社会。

Acknowledgements

The contribution of John L. Provis to this work was funded by the Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC), UK (EP/S019650/1). The participation of Susan A. Bernal in this work was funded by EPSRC via an Early Career Fellowship grant (EP/R001642/1), and the Transforming Foundation Industries: Network+ Towards Value by Innovation (EP/V026402/1). The participation of Zuhua Zhang was funded by the National Nature Science Foundation of China (U2001225), Fundamental Research Funds for the Central Universities (22120230174 at Tongji University), and Geopoly® Fundamental Genomic Research project.

References

- [1] Royal Academy of Engineering and National Engineering Policy Centre. Decarbonising construction: building a new net zero industry. Report. London: Royal Academy of Engineering; 2021.
- [2] Habert G, Miller SA, John VM, Provis JL, Favier A, Horvath A, et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nat Rev Earth Environ* 2020;1(11):559–73.
- [3] Scrivener KL, John VM, Gartner EM. Eco-efficient cements: potential, economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. Paris: United Nations Environment Programme; 2016.
- [4] Cement G, Association C. Concrete future: the GCCA 2050 cement and concrete industry roadmap for net zero concrete. Report. London: Global Cement and Concrete Association; 2021.
- [5] International Energy Agency and Cement Sustainability Initiative. Technology roadmap: low-carbon transition in the cement industry. Report. Paris: International Energy Agency; 2018.
- [6] Purnell P. Material nature versus structural nurture: the embodied carbon of fundamental structural elements. *Environ Sci Technol* 2012;46(1):454–61.
- [7] Flatt RJ, Roussel N, Cheeseman CR. Concrete: an eco material that needs to be improved. *J Eur Ceram Soc* 2012;32(11):2787–98.
- [8] Provis JL. Innovation in cements—can we meet future construction needs sustainably? In: Proceedings of the 6th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures (CIGOS21) (Lecture Notes in Civil Engineering vol. 203); 2021 Oct 28–29; Ha Long, Vietnam. Singapore: Springer; 2021.
- [9] Shi C, Qu B, Provis JL. Recent progress in low-carbon binders. *Cement Concr Res* 2019;122:227–50.
- [10] Yousuf S, Sanchez LFM, Shammeh SA. The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry. *J Build Eng* 2019;25:100815.
- [11] Hawkins W, Orr J, Shepherd P, Ibell T. Design, construction and testing of a low carbon thin-shell concrete flooring system. *Structures* 2019;18:60–71.
- [12] Provis JL, van Deventer JSJ. Alkali-activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM. Berlin: Springer; 2014.
- [13] Krivenko PV. Alkaline cements. In: Proceedings of the 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes; 1994 Oct 11–14; Kiev, Ukraine. Kiev: VIPOL Stock Company; 1994.
- [14] Luukkonen T, Abdollahnejad Z, Yliniemi J, Kinnunen P, Illikainen M. One-part alkali-activated materials: a review. *Cement Concr Res* 2018;103:21–34.
- [15] Juenger MCG, Snellings R, Bernal SA. Supplementary cementitious materials: new sources, characterization, and performance insights. *Cement Concr Res* 2019;122:257–73.
- [16] Khalifa AZ, Cizer Ö, Pontikes Y, Heath A, Patureau P, Bernal SA, et al. Advances in alkali-activation of clay minerals. *Cement Concr Res* 2020;132:106050.
- [17] Bernal SA, Rodríguez ED, Kirchheim AP, Provis JL. Management and valorisation of wastes through use in producing alkali-activated cement materials. *J Chem Technol Biotechnol* 2016;91(9):2365–88.
- [18] Garcia-Lodeiro I, Fernandez-Jimenez A, Palomo A. Hydration kinetics in hybrid binders: early reaction stages. *Cement Concr Compos* 2013;39:82–92.
- [19] Velandia DF, Lysdale CJ, Provis JL, Ramirez F. Effect of mix design inputs, curing and compressive strength on the durability of Na₂SO₄-activated high volume fly ash concretes. *Cement Concr Compos* 2018;91:11–20.
- [20] Rossi L, Miranda de Lima L, Sun Y, Dehn F, Provis J, Ye G, et al. Future perspectives for alkali-activated materials: from existing standards to structural applications. *RILEM Tech Lett* 2023;7:159–77.
- [21] Van Deventer JSJ, San Nicolas R, Ismail I, Bernal SA, Brice DG, Provis JL. Microstructure and durability of alkali-activated materials as key parameters for standardisation. *J Sustain Cem-Based Mater* 2015;4(2):116–28.
- [22] British Standards Institute (BSI). BSI PAS 8820-2016: construction materials—alkali-activated cementitious material and concrete. British Standard. London: British Standards Institute; 2016.
- [23] VicRoads. Section 703: general concrete paving. Australia Standard. Victoria: VicRoads; 2010.
- [24] Provis JL, Arbi K, Bernal SA, Bondar D, Buchwald A, Castel A, et al. RILEM TC 247-DTA round robin test: mix design and reproducibility of compressive strength of alkali-activated concretes. *Mater Struct* 2019;52:99.
- [25] Gluth GJG, Arbi K, Bernal SA, Bondar D, Castel A, Chithiraputhiran S, et al. RILEM TC 247-DTA round robin test: carbonation and chloride penetration testing of alkali-activated concretes. *Mater Struct* 2020;53(1):21.
- [26] Winnefeld F, Gluth GJG, Bernal SA, Bignozzi MC, Carabba L, Chithiraputhiran S, et al. RILEM TC 247-DTA round robin test: sulfate resistance, alkali-silica reaction and freeze–thaw resistance of alkali-activated concretes. *Mater Struct* 2020;53(6):140.
- [27] Li Z, Chen Y, Provis JL, Cizer Ö, Ye G. Autogenous shrinkage of alkali-activated slag: a critical review. *Cement Concr Res* 2023;172:107244.
- [28] Wang A, Zheng Y, Zhang Z, Liu K, Li Y, Shi L, et al. The durability of alkali-activated materials in comparison with ordinary Portland cements and concretes: a review. *Engineering* 2020;6(6):695–706.
- [29] Gluth GJG, Ke X, Vollpracht A, Weiler L, Bernal SA, Cyr M, et al. Carbonation rate of alkali-activated concretes and high-volume SCM concretes: a literature data analysis by RILEM TC 281-CCC. *Mater Struct* 2022;55(8):225.
- [30] Crossin E. The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute. *J Clean Prod* 2015;95:101–8.
- [31] Brinkman L, Miller SA. Environmental impacts and environmental justice implications of supplementary cementitious materials for use in concrete. *Environ Res Infrastruct Sustain* 2021;1(2):025003.