



RILEM 最新技术发展报告 TC 224-AAM

碱激发材料

Alkali Activated Materials

John L. Provis[英] Jannie S.J.van Deventer[澳] 主 编

刘 泽 彭桂云 王栋民 王群英 主 译

张大旺 陈仕国 副主译



中国建材工业出版社



RILEM 最新技术发展报告 TC 224-AAM

碱 激 发 材 料

Alkali Activated Materials

John L. Provis [英] Jannie S. J. van Deventer [澳] 主 编
刘 泽 彭桂云 王栋民 王群英 主 译
张大旺 陈仕国 副主译

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

碱激发材料 / 刘泽等编译 ; (英) 约翰·普罗维斯
(John L. Provis), (澳) 詹妮·范德文特
(Jannie S. J. van Deventer) 主编. —北京: 中国建
材工业出版社, 2019. 1

书名原文: Alkali Activated Materials: State-of-
the-Art Report, RILEM TC 224-AAM

ISBN 978-7-5160-2434-8

I. ①碱… II. ①刘… ②约… ③詹… III. ①建筑材
料-胶凝材料 IV. ①TU526

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 228356 号

First published in English under the title

Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM

edited by John Provis and Jannie van Deventer, edition: 1

Copyright© RILEM, 2014 *

This edition has been translated and published under licence from Springer Nature B. V. .
Springer Nature B. V. takes no responsibility and shall not be made liable for the
accuracy of the translation.

本书中文简体字版专有出版权由 Springer Nature B. V. 授予中国建材工业出版社。未经出版
者预先书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

碱激发材料

John L. Provis [英] Jannie S. J. van Deventer [澳] 主 编

刘 泽 彭桂云 王栋民 王群英 主 译

张大旺 陈仕国 副主译

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 20.5

字 数: 490 千字

版 次: 2019 年 1 月第 1 版

印 次: 2019 年 1 月第 1 次

定 价: 98.00 元

著作权合同登记图字: 01-2018-6527 号

本社网址: www.jcbs.com, 微信公众号: zgjcgybs

请选用正版图书, 采购、销售盗版图书属违法行为

版权专有, 盗版必究。本社法律顾问: 北京天驰君泰律师事务所, 张杰律师

举报信箱: zhangjie@tiantailaw.com 举报电话: (010) 68343948

本书如有印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换, 联系电话: (010) 88386906

RILEM 最新技术发展报告 第 13 卷

国际材料与结构研究实验联合会 (the International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structure, RILEM) 成立于 1947 年, 是旨在推动建筑科学、技术和工业化发展的非政府科技联盟, 实现该领域研究与应用间的技术转化。RILEM 关注建筑材料及其在建筑和市政工程材料中的应用, 涵盖了从建筑建造、使用和材料回收的全过程。RILEM 的更多信息和前期出版物都可以在 www.RILEM.net 上查到。RILEM 最新技术发展报告 (STAR) 是由技术委员会 (TC) 撰写的。这些报告是 RILEM 最重要的对外公开资料——报告该领域最前沿的科学与工程资讯。TC 的工作是 RILEM 重要职能之一。TC 的成员都是本领域的专家, 在他们的空余时间分享他们的专业知识。所以, 广大科技界同仁都受益于 RILEM 的相关活动。RILEM 的目标就是要把该领域的最新资讯广泛传播给科学界。因此, RILEM 非常重视 STAR 技术委员会的发展报告, 并且尽可能鼓励他们出版。发展报告以及类似报告的提出为实际标准规范的提高提供科学基础。只有具备坚实的科学基础, 建筑工程实战才能更高效、更经济。RILEM 也期望这份报告内容能广泛用于科学界。

了解更多内容请登录 <http://www.springer.com/series/8780>。

编者 (外)

John L. Provis

Department of Materials Science

and Engineering

University of Sheffield

Sheffield, South Yorkshire, UK

Jannie S. J. van Deventer

Zeobond Group, Docklands, Australia

Department of Chemical and Biomolecular Engineering

University of Melbourne

Melbourne, Australia

ISSN 2213-204X

ISSN 2213-2031 (electronic)

ISBN 978-94-007-7671-5

ISBN 978-94-007-7672-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-94-007-7672-2

Springer Dordrecht Heidelberg New York London

Library of Congress Control Number: 2013954333

©RILEM 2014

本作品受版权保护。发行商保留一切权利，无论是全部还是部分材料，具体涉及翻译、重印、使用插图、朗诵、广播、复制缩微胶片或其他物理方式的权利，以及传输或信息储存和检索、电子转印、计算机软件或通过现在已知或后来发展的类似或者不同方法。与评论或学术分析及材料相关的摘录豁免此法定保留，这些专门用于计算机系统的输入和执行，供买方作品专用。本出版物或其部分的复制仅可在本地“出版者著作权法”条款规定下进行，在当前版本中，使用许可必须在 Springer 获得。使用权限可以通过版权清除中心的 RightsLink 获得。违反相关著作权法的行为可能受到起诉。

本出版物中对使用的一般描述性名称、注册名称、商标、服务标志等没有作出声明，即使没有具体声明，这些名称也免除相关的保护性法律法规，因此一般可免费使用。

尽管认为在出版时本书中的建议和信息都是真实正确的，但作者、编辑及发行人员对出现的错误和删漏都不承担任何的法律 responsibility。出版商对本文出现的材料不作任何说明或暗示的保证。

本出版物印在无酸纸上。

Springer 是 Springer Science+Business Media 的一部分 (www.springer.com)。

中文版前言

碱激发材料 (AAM) 的概念自 20 世纪初为人所知, 至今已超过一百年, 在前苏联、中国、澳大利亚等国有几十年的工程应用示范, 但一直没有在世界范围内大规模推广。随着水泥基胶凝材料原材料的大量开采使用, 从 20 世纪 90 年代, 国际上对碱激发材料的基础研究又开始蓬勃发展, 特别是在中国, 改革开放和工业化发展不断深入, 产生出大量铝硅酸盐工业固体废弃物, 活性铝硅酸盐固废 (如粉煤灰、冶金渣、煤系高岭土、赤泥等) 制备碱激发材料的研究不断扩展和深入。工业固废制备碱激发材料的基础理论、技术、标准和产业化推广亟需一本专业的指导教材。

国际材料与结构研究实验联合会 (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structure, RILEM) 在此背景下, 于 2006 年发起成立了碱激发材料技术委员会, 并由英国 John L. Provis 教授和澳大利亚 Jannie S. J. van Deventer 教授组织编写《碱激发材料》一书。该书是针对碱激发材料发布的最新研究报告, 具有广泛的国际影响力, 得到业界同仁的一致认可和赏识。

为此, 在获得出版公司 (Springer) 授权许可下, 我们一年前组织了行业力量对本书进行中文版的翻译工作。经过一年多紧锣密鼓的组织翻译和校对, 终于将此书审阅完成。

中文版的组织翻译工作, 主要由中国矿业大学 (北京) 混凝土与环境材料研究院王栋民老师和刘泽老师及其研究生, 以及华电电力科学研究院彭桂云院长和王群英主任及其团队成员完成。其中第 1 章由王栋民、刘泽主译, 第 2 章由张大旺、房奎圳主译, 第 3 章由于杰、崔勇主译, 第 4 章由任才富、刘少卿主译, 第 5 章由刘泽、王琳琳主译, 第 6 章由彭桂云、苏彤主译, 第 7 章由王群英、芮雅峰主译, 第 8 章由周瑜、张明娟主译, 第 9 章由王栋民、张川川主译, 第 10 章由张雷、陈仕国主译, 第 11 章由刘泽、程国东主译, 第 12 章由亢一星、陈仕国主译, 第 13 章由王栋民、刘泽主译。之后, 刘泽老师和张大旺博士对全书进行了校对和审定, 王栋民老师和彭桂云院长再次进行专业校对, 最终由刘泽老师全面审阅和最终定稿, 始今交付正式出版。

《碱激发材料》从组织翻译、校对到最终审阅、出版印刷, 众多参与者付出巨大辛劳, 在整个出版过程中, 得到了各方面专家和领导的支持与帮助。在此, 对所有参与本书出版工作的朋友和业界人士致以最真诚的敬意和感谢!

毋庸讳言, 由于水平和精力有限, 翻译、校对和审阅工作仍有遗漏和瑕疵, 敬请读者批评指正!

刘 泽
2018 年 8 月

序 言

作为一种硅酸盐水泥的替代品,碱激发材料(AAM)的概念早在1908年之前就已为人所知。另外,碱激发材料在实际应用过程中的耐久性已经过比利时、芬兰、苏联和中国以及近期在澳大利亚几十年的验证。尽管如此,AAM的基础研究从20世纪90年代才在国际上蓬勃发展起来,并且大多数的研究都集中在碱激发材料的微观结构,缺少使用寿命、耐久性和工程应用性能的研究。近年来,碱激发材料的研究被视作一项具有应用潜力的研究方向,但在大宗工程应用中还不能替代硅酸盐水泥。

碱激发材料技术因诸多原因,导致其不能像硅酸盐水泥一样受到市场青睐。首先,石灰石几乎遍布各地,硅酸盐水泥能够就近市场生产。相比之下,碱激发材料的原料像粉煤灰、冶金矿渣等不能随处可得,或者其供应链在当地市场还没有建立起来。第二,从20世纪70年代以来,外加剂的快速发展极大地提高了现代硅酸盐水泥混凝土的和易性或硬化特性。与现代混凝土相比,碱激发材料缺乏适应性良好的外加剂的问题,已成为一个重要挑战。第三,硅酸盐水泥拥有超过150年的广泛使用记录,而AAM技术的应用范围有限,如苏联早期的示范项目并没有得到推广。第四,不同区域的普通混凝土以及粉煤灰和高炉矿渣等作辅助胶凝材料的混凝土标准均以硅酸盐水泥为依托,导致了AAM混凝土市场应用时并不符合现有标准,造成决策者尤其是咨询工程师和投资方将会承担更大的风险和责任。第五,与硅酸盐水泥混凝土标准相关的一系列耐久性测试方法虽然不完善,但已被市场接受,这主要由硅酸盐水泥混凝土的大量应用跟踪记录作支撑。由于缺少长期的应用跟踪记录,以及实验室耐久性测试在预测使用寿命时的不确定性,使得AAM进入市场面临挑战。第六,现有的硅酸盐水泥混凝土工程设计准则都是建立在一系列不同环境条件下混凝土微观结构行为的隐含假设上,这些假设不一定适用于AAM,修订AAM设计标准还需更多的研究。

显然,AAM在市场应用方面面临着巨大挑战。AAM的发展和商业化应用取得的重大进步,承担着过去几十年许多人的愿景和希望。然而,近年来AAM受到广泛关注的主要原因是:与硅酸盐水泥相比,其 CO_2 排放大幅减少。 CO_2 潜在交易市场以及当前或未来 CO_2 减排法规的出台,为AAM在精心选择的商业项目中应用提供了动力。大规模AAM示范项目推动了进一步的基础研究,也为了解AAM耐久性和工程性能提供依据。与此同时,某些区域对非硅酸盐水泥基材料的认可度提高取得了巨大的进步,例如在结构建筑方面的应用。因此,世界各地对AAM的信心随着与关键研究进展相关联的商业进步而增长。现在已有坚实的科学体系支撑着AAM技术,并且该领域的论文数量呈指数增长,而且更多文章出现在高水平的期刊上。

非常感谢西班牙马德里爱德华多·托罗亚建筑科学研究所 Angel Palomo 教授的建议,他建议在2006年年底,建立一个AAM领域的RILEM技术委员会(TC)。Palomo教授也是该技术委员会的首位秘书长。衷心感谢他对本委员会和AAM领域的贡献。2007年

RILEM 批准成立 TC 224-AAM, 这是一种新型建筑材料走上正规化道路的重要一步。值得一提的是, TC 224-AAM 是该领域第一个国际委员会, 其成员涵盖混凝土材料的各个方向, 都是 AAM 方面的权威专家。技术委员会成立 6 年来, 会员人数略有变化, 最后 36 名成员写出了代表 15 个国家的发展报告。

根据 RILEM 的职能范围, TC 的活动主要专注于 AAM 在建筑材料方面的应用, 包括混凝土、砂浆和灌浆料, 不包括 AAM 作为高温陶瓷型材料的应用。TC 有三个主要的目标: (1) 审查 AAM 化学和材料科学的研究发展报告以及 AAM 混凝土的服役性能; (2) 评估现行的标准体系, 搭建一个适用于不同区域的 AAM 标准体系; (3) 评估 AAM 耐久性的物理和化学测试方法, 制定出合适的测试方法并纳入到新标准的框架。显然从一开始, 对可用于 AAM 的各种原材料和激发条件来说, 现有规范标准并不合适。AAM 本身就是一个复杂的领域, 需要有一个新的 AAM 混凝土性能测试标准体系, 这还需进一步的工作。

TC 基本符合上述三个目标。同时, TC 充分认识到, 对 AAM 的理解我们还有很大差距, 因此在以下领域需要做更多的工作: (1) 当低钙和高钙原料组合使用时, 需进一步理解凝胶相形成的机制, 指导实际混料和养护条件下形成不易干燥开裂的稳定凝胶; (2) 在调节混凝土的凝结时间、流变性、工作性以及养护条件方面, 化学外加剂的开发还很缺失; (3) 尽管 AAM 中的碱-骨料反应比水泥混凝土中的影响较小, 但对 AAM 混凝土中的膨胀问题依然知之甚少; (4) AAM 混凝土在化学和物理侵蚀条件下表现良好, 但还没有足够的工作使实验室测试数据与服役性能关联; (5) 现有的测试方法似乎不适用于 AAM 混凝土的碳化测试; (6) AAM 混凝土的徐变行为缺乏深入的研究, 这对结构设计是一个瓶颈。希望该发展报告能够增强 AAM 作为建筑材料的信心, 促进对其进一步的研究, 推动 AAM 的商业化, 进而服务于 AAM 相关建筑协会或学会。

TC 224-AAM 由以下三个工作组 (WG) 组成: (1) WG 1, 由 John Provis 教授 (先前就职于澳大利亚墨尔本大学, 现就职于英国谢菲尔德大学) 领导, 组织撰写了 AAM 研究和工业化应用的相关内容; (2) WG 2, 由瑞士 Holcim 的 Lesley Ko 博士领导, 组织撰写了不同区域的现有标准, 制定了 AAM 性能标准的框架; (3) WG 3, 由 Ing. Anja Buchwald 博士 (先前就职于德国魏玛包豪斯大学, 2009 年以来就职于荷兰 ASCEM) 领导, 组织撰写了 AAM 测试方法的开发, 旨在为性能标准提供框架。三个工作组的工作有所重叠, 技术委员会在 2011 年写出发展报告的草稿, 工作组通过技术委员会联席会议合并所有内容, 成员间通过电子邮件对报告内容做了充分的讨论及修改。衷心感谢 John Provis 教授、Lesley 博士和 Ing. Anja Buchwald 博士推动工作组的相关工作。也要感谢所有技术委员会成员对工作组工作的贡献、指导和建议, 这些工作不一定能完全反映在本报告中。

TC 224-AAM 成立大会于 2007 年 9 月 5 日在比利时 Ghent 举行。WG2 于 2008 年 3 月 27 至 28 日在瑞士苏黎世和 10 月 2 日至 3 日在西班牙 València 举办了专题研讨会。TC 224-AAM 第二次联席会议于 2008 年 6 月 9 日在捷克共和国 Brno 举行, 连同 6 月 10 日至 12 日在 Brno 举办的第三届非传统水泥和混凝土国际研讨会, 大多数技术委员会成员都参加了该会议。2009 年 5 月 28 日, 技术委员会在乌克兰基辅举办了关于 AAM 的研讨会, 在此期间提交了 15 篇技术论文。这次研讨会之后是 2009 年 5 月 29 日的第三次技术委员会联席会议。

第四次技术委员会会议，连同作为第七届水泥和混凝土国际会议一部分的第一届国际化学活性材料进展大会 (CAM' 2010) 于 2010 年 5 月 9 日在中国山东济南举办。CAM' 2010 年会议记录由史才军和沈晓冬编辑，并由 RILEM 出版刊物 S. A. R. L 于 2010 年在 Bagneux 出版作为第 72 卷论文集。许多技术委员会成员为 2010 年的 CAM 作出了贡献，其中包括 6 场主旨演讲和 23 篇学术论文。第五次 TC 224-AAM 联席会议于 2011 年 7 月 1 日在西班牙马德里举办，结合第十三届国际水泥化学大会 (XIII ICCI)，其中许多技术委员会成员参加了此次会议。2011 年 7 月 2 日在马德里大会前由 RILEM 和第十三届 ICCI 共同主办 AAM 培训课程，60 位代表出席。第六次，也是最后一次 TC 224-AAM 联席会议于 2011 年 9 月 7 日在中国香港特别行政区举行，作为 RILEM 交流周的一部分。技术委员会主席和秘书长向 RILEM 交流周的与会代表就 TC 224-AAM 的工作作了详细汇报。特别感谢众多 TC 224-AAM 成员担任技术委员会和工作组会议的会议主席，对他们的专业、慷慨、热情、好客、友谊表示赞许。作为技术委员会的一员，我们一起努力工作，共享了许多乐趣和美好时光，希望每个人都能像我一样珍惜。2012 年全年及 2013 年上半年我们都致力于完成这份发展报告。衷心感谢编写本报告 13 章的所有作者，感谢他们在撰写文稿时的努力工作、奉献精神和合作精神。许多作者花了大量的时间和精力来起草，希望本报告能够成为在 AAM 领域很有价值的参考出版物。应当注意的是，每章作者在一般情况下是按字母表顺序排列；对于那些大部分由一位作者撰写的章节，该作者首先列出，而其他按字母表顺序排列。特别要向澳大利亚珀斯科廷大学的 Arie van Riessen 教授和瑞士 Empa 的 Frank Winnefeld 博士表示感谢，他们慷慨地为各个章节的草稿做了审阅和修订。相信所有的技术委员会成员，尤其是作者们，很高兴与我一起特别感谢 John Provis 教授为 TC 224-AAM 运行付出的巨大努力和贡献。作为技术委员会秘书长，大部分时间里他确保会议顺利进行，会议记录一丝不苟，保证 RILEM 办公室与技术委员会的有效沟通。此外，Provis 教授作为共同主编远远超出了其责任范围，以确保这份发展报告成为我们都引以为傲的文件。我代表技术委员会成员向他无私的奉献表示深深的感谢。

Prof. Jannie S. J. van Deventer (墨尔本 Zeobond 有限公司及澳大利亚墨尔本大学)

RILEM 技术委员会 TC 224-AAM 主席

作者：John L. Provis^{1, 2} and Jannie S. J. van Deventer^{2, 3}

发展报告主题：“碱激发材料：最新技术发展报告，RILEM TC 224-AAM”

1 谢菲尔德大学材料科学与工程系，谢菲尔德 Mappin 大街 Robert Hadfield 爵士大楼 S1 3JD, 英国。

2 墨尔本大学化学与生物分子工程系，维多利亚州 3010, 澳大利亚。

3 Zeobond 有限公司，维多利亚州 8012 码头区 23450 号邮箱，澳大利亚。

技术委员会成员名单

- | | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| K. Abora, UK | P. Nixon, UK |
| I. Beleña, Spain | L. Ordoñez, Spain |
| S. Bernal, Australia/UK | M. Palacios, Spain/Switzerland |
| V. Bilek, Czech Republic | A. Palomo, Spain |
| D. Brice, Australia | Z. Pan, China |
| A. Buchwald, Germany/Netherlands | J. Provis, Australia/UK |
| J. Deja, Poland | F. Puertas, Spain |
| A. Dunster, UK | D. Roy, USA |
| P. Duxson, Australia | K. Sagoe-Crentsil, Australia |
| A. Fernández-Jiménez, Spain | R. San Nicolas, Australia |
| E. Gartner, France | J. Sanjayan, Australia |
| J. Gourley, Australia | C. Shi, China |
| S. Hanehara, Japan | J. Stark, Germany |
| E. Kamseu, Italy/Cameroon | A. Tagnit-Hamou, Canada |
| E. Kavalerova, Ukraine | J. Van Deventer, Australia |
| L. Ko, Switzerland | A. Van Riessen, Australia |
| P. Krivenko, Ukraine | B. Varela, USA |
| J. Malolepszy, Poland | F. Winnefeld, Switzerland |

目 录

第 1 章 绪论和研究范围	1
1.1 报告结构	1
1.2 背景	1
1.3 激发剂与固体原料复合体系	3
1.4 术语说明	4
参考文献	5
第 2 章 历史背景与概述	8
2.1 碱激发材料发展的必然性	8
2.2 碱激发历史	14
2.3 碱激发溶液化学	15
2.4 碱激发技术的全球发展	20
2.5 碱激发材料在北欧、东欧和中欧地区的发展	20
2.6 碱激发材料在中国的研究状况	21
2.7 西欧与北美碱激发水泥的发展	23
2.8 大洋洲碱激发水泥的发展	25
2.9 拉丁美洲碱激发水泥的发展	26
2.10 印度碱激发水泥的发展	26
2.11 小结	26
参考文献	26
第 3 章 胶凝材料化学——高钙碱激发胶凝材料	50
3.1 介绍	50
3.2 矿渣基碱激发胶凝材料的结构与化学特性	50
3.3 矿渣体系的激发剂	52
3.4 孔溶液化学	59
3.5 BFS 性能的影响	60
3.6 C-S-H 中的碱（包括碱激发硅酸盐水泥）	61
3.7 非高炉矿渣前驱体	63
3.8 小结	65
参考文献	65
第 4 章 胶凝材料化学——低钙碱激发胶凝材料	78
4.1 低钙碱激发胶凝材料	78
4.2 胶凝材料的结构特性和激发剂的影响	79
4.3 粉煤灰及其与碱性溶液的相互作用	83
4.4 天然矿产资源	85

4.5	火山灰和其他天然火山灰	87
4.6	低钙冶金渣	88
4.7	合成体系	89
4.8	小结	89
	参考文献	89
第5章	胶凝材料化学——复合体系和中钙体系	107
5.1	引言	107
5.2	复合胶凝体系中的共生凝胶	107
5.3	中钙体系中的激发剂	108
5.4	单一原料	109
5.5	复合原料	110
5.6	小结	115
	参考文献	115
第6章	外加剂	124
6.1	碱激发体系的外加剂定义	124
6.2	引气剂	125
6.3	促凝剂和缓凝剂	125
6.4	减水剂和高效减水剂	127
6.5	减缩剂	128
6.6	小结	129
	参考文献	129
第7章	碱激发混凝土——配合比设计标准和早期性能	133
7.1	简介	133
7.2	TC 224-AAM 标准编制规划——基于性能实施方案	134
7.3	碱激发胶凝材料的标准	135
7.4	碱激发混凝土的标准	137
7.5	与 AAM 有关的现行标准调研	140
7.6	原材料分析	141
7.7	养护的重要性	142
7.8	小结	142
	参考文献	143
第8章	耐久性和测试——化学基体裂化过程	149
8.1	引言	149
8.2	抗硫酸盐测试	149
8.3	碱-骨料反应	154
8.4	浸出试验	162
8.5	耐酸性	168
8.6	耐碱性	171
8.7	海水侵蚀	172

8.8 软水侵蚀	172
8.9 生物诱导侵蚀	172
8.10 小结	172
参考文献	173
第 9 章 耐久性和测试——劣化与物质传输	182
9.1 简介	182
9.2 渗透性和孔隙率	182
9.3 界面过渡区	189
9.4 氯化物	190
9.5 钢筋锈蚀直接分析	193
9.6 碳化	197
9.7 风化	204
9.8 小结	205
参考文献	206
第 10 章 耐久性和测试——物理性能	226
10.1 引言	226
10.2 力学性能测试	226
10.3 收缩和开裂	231
10.4 徐变	235
10.5 冻融和抗冻性	236
10.6 小结	239
参考文献	240
第 11 章 建筑与市政基础设施的示范项目和应用	251
11.1 引言	251
11.2 碱激发 BFS 混凝土构造	251
11.3 混凝土路面	254
11.4 地下及沟槽结构	255
11.5 比利时布鲁塞尔 Le purdociment 公司	256
11.6 Pyrament 水泥及相关产品 (法国的 Cordi-Géopolymère/美国的 Lone star)	256
11.7 芬兰开发的 F 混凝土以及其他材料	257
11.8 ASCEM 水泥 (荷兰)	258
11.9 E-Crete 水泥	263
11.10 不同地区的铁路轨枕	267
11.11 小结	267
参考文献	267
第 12 章 碱激发材料的其他潜在应用	272
12.1 引言	272
12.2 轻质碱激发材料	272

12.3 油井水泥..... 274

12.4 高温性能..... 274

12.5 废弃物的稳定化/固化 281

12.6 纤维增韧..... 287

12.7 小结..... 290

参考文献..... 290

第 13 章 碱激发技术的总结与展望 307

13.1 技术委员会的成果总结..... 307

13.2 碱激发的未来..... 308

13.3 结语..... 311

第 1 章 绪论和研究范围

John L. Provis

1.1 报告结构

本报告由 RILEM 碱激发材料技术委员会 (TC 224-AAM) 编写。技术委员会的目标有三个：分析碱激发技术的工艺现状；就目前对碱激发材料的了解，为国家标准发布提供建议；开发出合适的测试方法并纳入到推荐标准当中。TC 224-AAM 成立于 2007 年，是首个碱激发领域的国际技术委员会。技术委员会的重点在于建筑（混凝土、砂浆、灌浆和相关的材料）相关方面的应用，因而不包括碱激发胶凝材料作为低成本陶瓷材料在高温领域的应用。

该发展报告由五个主要部分组成，内容如下：

(1) 第 1 章和第 2 章包含了世界不同地区碱激发技术发展的历史概况，为理解该领域特有的发展模式提供了基础。

(2) 第 3、4、5 和 6 章重点讨论和分析了碱激发化学，以及在不同碱激发体系中结合相的性质：

- ① 高钙碱激发体系，特别是那些以冶金渣为基础的体系；
- ② 低钙碱激发体系，主要涉及碱铝硅酸盐，包括现在广为人知的“地质聚合物”；
- ③ 关于中间组成区的讨论，可以通过混合钙基和铝硅酸盐基的原料，也可以使用一些专有的原料；

④ 在开发具有所需性能的碱激发胶凝材料和混凝土时，化学外加剂在其中的作用。

(3) 第 7、8、9 和 10 章包含 TC 224-AAM 开展工作的技术核心，解决耐久性和工程性质、标准依据和测试方法等问题。

(4) 第 11 章和第 12 章概括了碱激发技术的一些应用（历史的和正在进行中的）以及实施碱激发技术的潜在领域。

(5) 第 13 章总结报告，概述了碱激发领域在研究、开发和标准化中未来的重大需求。

1.2 背景

碱性原料和铝质及硅质固体原料反应，形成能与硬化硅酸盐水泥相比的固体材料，这是 1908^[1]年由德国著名的水泥化学家及工程师 Kühl（图 1-1a）首次提出的，其中玻璃质炉渣与碱金属硫酸盐或碳酸盐组合，加或者不加碱土氧化物或氢氧化物作为“激发材料”，文献指出“完全等同于优良硅酸盐水泥”的性能。Purdon 在 1940 年的一篇重要期刊文献中（图 1-1b）详细地测试了超过 30 种不同的高炉矿渣，分别由 NaOH 溶液、NaOH 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 组合及不同的钠盐激发，并且得到了可与硅酸盐水泥比拟的强度发展以及最终强度指标，为胶

凝材料的发展提供科学基础。他也指出,与相同抗压强度的硅酸盐水泥相比,碱-矿渣水泥有更高的抗拉强度和抗折强度,硬化凝胶相具有低的溶解性和放热。Purdon 还提出这种混凝土制备方法对预拌混凝土和预制混凝土制品来说是理想的,其中激发剂的用量可以精确控制。然而,激发条件对需水量的敏感性,以及高浓度腐蚀性溶液的使用被认为是潜在的问题。随后 70 年的实验表明, Purdon 对这些问题的顾虑是正确的——例如 Wang 等人^[4]在 1995 年列出了相似的困难,但也表明每个人都可以通过正确运用科学知识来解决手头的问题。

UNITED STATES PATENT OFFICE.

HANS KÜHL, OF BLANKENESE, XESR HAMBURG, GERMANY, ASSIGNOR, BY MESNE ASSIGNMENTS, TO THE ATLAS PORTLAND CEMEXT COMPANY, OF NEW YORK, N. Y., A CORPOR. THON OF PENNSYLVANIA.

SLAG CEMENT AND PROCESS OF MAKING THE SAME.

No. 800,939.

Specification of Letters Patent.

Patented Oct. 13, 1908.

Application filed July 3, 1907. Serial No. 381,960.

(a)

THE ACTION OF ALKALIS ON BLAST.

FURNACE SLAG

By A. O. PURDON

Although slag may be considered to be a cement in itself, hydration proceeds with such extreme slowness that it cannot be used alone as such. The reactions are usually accelerated by incorporation with the slag of lime, Portland cement clinker, or anhydrite. The resulting cements, compared with Portland, are characteristically slow-hardening but attain great strength with time. A relatively small quantity of an alkali is a much more efficient accelerator. The resulting cement has greater strength, both initial and final, than Portland. The optimum quantity of caustic soda is 5—8% of the mixing water. The same effect is produced by incorporation of lime plus a sodium salt in such quantities as to produce a like quantity of nascent soda. Cements made in this way, apart from their characteristically high early strength, have the following advantages over Portland: (a) Heat of hydration is extremely low. (b) Concrete is practically watertight. (c) Low solubility in pure or aggressive waters.

(b)



(c)

图 1-1 关于矿渣反应活性的早期出版物

(a) 1908 年 Kühl 的专利; (b) 1940 年 Purdon 发表的“碱对高炉矿渣的作用”;

(c) 1959 年 Glukhovskiy 出版的图书《Gruntosilikaty》

关于碱激发技术的研究,早期主要集中在西欧地区,随后研究热潮逐步向东部扩展。苏联和中国的水泥短缺导致了对其替代材料的需求;碱激发技术在这两个区域都有发展,通过利用现有原材料,尤其是冶金矿渣,作为克服水泥短缺问题的方式之一。特别是苏联的工作由 Glukhovskiy^[5](图 1-1c)发起,位于基辅的研究所现在以其命名,主要关注冶金矿渣的碱碳酸盐激发。

在 Purdon 的工作之后,直到 20 世纪 80 年代,碱活性的研究在西方世界非常有限,正如 Roy^[6]在一篇评论中发表的时间表所强调的那样。Davidovits 在法国工作,他从 20 世纪 80 年代初开始申请了大量适用于小众应用的铝硅酸盐基配方专利^[7],并且首次对这类材料使用“地质聚合物”的名称^[8]。美国陆军在 1985 年发布了一项报告,讨论了碱激发技术在军事方面的潜在价值,尤其是作为一种混凝土高速公路的修补材料^[9]。这份报告是与当时以

Pyrament 为名出售碱活性胶凝材料的生产商一起编写的。

1.3 激发剂与固体原料复合体系

自从 20 世纪 90 年代以来，碱激发的研究在世界各地急剧增长，目前有超 100 个活跃的研究中心（学术和商业）遍布在每个有人居住的大陆上进行详细的研发活动。这项工作的主要目的是基于特定区域的原材料进行优异性能的材料开发。文献中提供的大量技术资料，报告了从特殊原材料和碱激发剂组合中得到的基本物理和/或微观结构性质。除了详细介绍这些成果，表 1-1 也总结了过去几十年出版的关于不同原料对不同碱来源激发适应性的总体结果。

表 1-1 不同固体原料与激发剂组合的总结（激发剂表现为可行/优异）

激发剂 固体原料	MOH	M ₂ O · rSiO ₂	M ₂ CO ₃	M ₂ SO ₄	其他
高炉矿渣	可行 § 3.2, § 3.3.1	优异 § 3.2, § 3.3.2	合适 § 3.3.3	可行 § 3.3.4	
粉煤灰	优异 § 4.2.1, § 4.3, § 5.4.1	优异 § 4.2.2, 4.3, § 5.4.1	差—加入水泥/熟料变得可行 § 5.5.5	只能添加水泥/熟料 § 5.5.4	NaAlO ₂ —可行 § 4.2.3
煅烧黏土	可行 § 4.2.1, § 4.4.1, § 4.4.2	优异 § 4.2.2, § 4.4.1, § 4.4.2	差	只能添加水泥/熟料 § 5.5.5	
天然火山灰质材料及火山灰	可行/优异 § 4.5	优异 § 4.5			
骨架铝硅酸盐	可行 § 4.4.3	可行 § 4.4.3	只能添加水泥/熟料	只能添加水泥/熟料	
合成玻璃质原料	可行/优异（取决于玻璃组成） § 4.7	优异 § 4.7			
钢渣		优异 § 3.7.1			
磷渣		优异 § 3.7.2			
镍铁渣		优异 § 3.7.3, § 4.6			
铜渣		可行（磨细矿渣不确定） § 3.7.3			
赤泥		可行（添加矿渣更好） § 5.5.4			