



水泥与混凝土研究进展

——第14届国际水泥化学大会论文综述

主 编 姚 燕
副主编 史才军
主 审 阎培渝 王培铭 钱觉时

中国建材工业出版社

水泥与混凝土研究进展

——第 14 届国际水泥化学大会
论文综述

主 编 姚 燕

副主编 史才军

主 审 阎培渝 王培铭 钱觉时

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水泥与混凝土研究进展：第 14 届国际水泥化学大会
论文综述 / 姚燕主编. -- 北京：中国建材工业出版社，2016.10

ISBN 978-7-5160-1647-3

I. ①水… II. ①姚… III. ①水泥—国际学术会议—
文集—英文 ②混凝土—国际学术会议—文集—英文 IV.
①TQ172.7-53 ②TU528-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 218290 号

水泥与混凝土研究进展——第 14 届国际水泥化学大会论文综述

主 编 姚 燕

副主编 史才军

主 审 阎培渝 王培铭 钱觉时

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：17

字 数：410 千字

版 次：2016 年 10 月第 1 版

印 次：2016 年 10 月第 1 次

定 价：126.00 元



本社网址：www.jcbs.com 微信公众号：zgjcgychs

本书如出现印装质量问题，由我社网络直销部负责调换。联系电话：(010) 88386906

本书编委会

主 编 姚 燕

副主编 史才军

主 审 阎培渝 王培铭 钱觉时

编委会（按姓氏拼音排序）：

程 新 崔素萍 晋占平 孔祥明 李宗津

李克非 李 娟 钱觉时 沈晓冬 王培铭

王子明 王 玲 阎培渝 余其俊 张文生

序 一

“只有有效地继承人类知识，同时把世界最先进的科学技术知识拿到手，我们再向前迈出半步，就是最先进的水平、第一流的科学家”。诺贝尔物理奖获得者温伯格曾如是说。

国际水泥化学大会是水泥科学界万众瞩目的盛会，历届会议均能比较全面地反映当前水泥科技的先进水平和今后的发展方向，深得各国水泥界的重视。大会论文集是我们水泥科学工作者继承和掌握行业最先进科学知识的最有效途径。

本人一直心系行业发展，亦一直关注大会的情况。非常遗憾因身体原因未能身临第14届国际水泥化学大会现场，大会主席姚燕会后特别为我颁发了大会设立的“国际水泥与混凝土领域杰出贡献奖”，也介绍了此次北京召开大会的相关情况。作为老一辈混凝土科研工作者，对百年大会在中国的成功举办表示欣慰和祝贺，同时也非常感谢姚燕院长和她的团队对本次大会做出的卓越工作。此外，我还提出了几点建议和希望：一是约请专家对第14届国际水泥化学大会的700篇论文撰写评论性综述文章，最好有相关的评论，扩大本次大会的学术影响。二是总结对比国内与国外水泥化学研究方面的优势与不足，加强对国内基础研究的重视程度，水泥创新还要走更深的基础研究的路。三是要树立旗帜，做到国内的水泥化学不止有高原还要有高峰。姚燕院长当时即表示会尽快落实。

1980年我国首次组织了以吴中伟院士为团长的8人代表团，我作为团员之一参加了巴黎第7届水泥化学会议，在会上就碱骨料反应的机理、影响因素和竞争反应理论作了发言。会后我们著有《第7届国际水泥化学大会论文专题简介》供国内同仁交流分享。自1980年之后，每届会议我国都有派员参加，参会人员会后就会议报告的研究动向以多种方式介绍给国内学者，甚至有些专题报告已有详细的译稿，方便业内读者查阅。

国际水泥化学大会的论文集是对水泥化学所取得最新研究进展的记录，具有里程碑式的意义。但如果对论文集不作系统性的整理、概括、归纳、分析，形如一盘散沙，国内读者难以完全取其精华。姚燕院长组织国内专家根据不同专题撰写这本综述，可谓用心良苦，为我国水泥科学的进步贡献了一份力量。这本综述各专题的编委都是相关领域内的权威和专家，感谢他们所付出的无私的智力劳动。希望国内同仁能好好研习利用，方不负专家们所付出的心力！

唐明述

2016年4月

序 二

从1824年算起,水泥的历史不足200年,相对其他材料而言,水泥既是传统的,又是现代的,更是当今社会发展不可或缺的主要建筑材料。但人类的发展必须是理性的、有条件的、可持续的和与自然相和谐的。全球气候急剧变暖的不争事实,水泥行业有责任给出部分解决方案,水泥科学起着举足轻重的作用。

创立于1919年的国际水泥化学大会是国际水泥科技界历史最悠久、规模最大、学术水平最高的盛会,被誉为国际水泥学术界的奥林匹克。历届国际水泥化学大会的学术报告均反映了当前世界水泥科学与技术的先进水平及发展动态,是引领全球水泥行业科学进步的源头之水。

2015年在北京召开的第14届国际水泥化学大会系国际水泥化学大会首次在中国召开,大会主题为“低碳水泥与绿色发展”,我参加了本次大会,并在会上作了“论中国水泥工业的未来”的主题报告,对我国水泥工业的未来发展提出了一套新的理念、方法和技术路径,重点强调了创新、协调、绿色、开放和共赢发展在水泥工业中的具体实践。

国际水泥化学大会的论文集是对近年来水泥化学所取得最新研究进展的记录,历来被国内外同仁奉为思想集锦,也是我国水泥科学工作者了解世界水泥的一个重要窗口。

值此第14届国际水泥化学大会成功举办之际,中国建筑材料科学研究总院组织国内著名学者精心编撰了《水泥与混凝土研究进展——第14届国际水泥化学大会论文综述》。汇集了自第13届国际水泥化学大会以来世界各国水泥化学研究的最新进展以及专家们对这些进展的精辟点评,内容丰富,精彩纷呈。在此,对参与编撰综述的专家学者们所付出的辛勤劳动表示深深的谢意。

我相信,《水泥与混凝土研究进展——第14届国际水泥化学大会论文综述》的出版将有助于我国水泥和混凝土方面的同仁们尽快了解国际最新发展动态,推进我国相关工业更好的绿色转型发展。

徐德龍

2016年4月

前 言

1918年,国际水泥化学大会“诞生”于伦敦,历经近一个世纪,发展为全球水泥科学技术领域历史最悠久、学术水平最高、参加国家和人数最多的国际学术盛会,被喻为国际水泥学术界的“奥林匹克”。第14届国际水泥化学大会是我国辗转20余年历经5次申办,最终获得2015年大会主办权,实现了我国水泥科技工作者几代人的夙愿。

第14届国际水泥化学大会于2015年10月13日到16日在北京召开,由中国硅酸盐学会和中国建筑材料科学研究总院共同主办。来自全球46个国家的1000余位代表莅临会议参与了学术研讨,是历届会议中参会人数最多的一次会议。这次大会的成功举办表明中国不仅有能力为世界水泥学术探索与交流做出实实在在的贡献,中国也愿意担负起水泥大国的责任,为世界水泥可持续发展奉献力量。

大会主题为“低碳水泥与绿色发展”,共收录了来自46个国家和地区的706篇论文。4天的会期交流了25个主题报告、26个邀请报告、198个口头报告和457篇张贴论文。论文分7个专题进行报告。7个专题分别是:

1. 熟料化学(含熟料制备工艺技术);
2. 水泥水化;
3. 辅助胶凝材料;
4. 化学添加剂;
5. 混凝土耐久性;
6. 替代胶凝材料;
7. 测试技术和标准。

会议的主报告论文发表在《Cement and Concrete Research》ICCC专刊上,邀请报告论文发表在《硅酸盐学报》专刊上,普通论文的摘要全部收录在大会摘要集中,普通论文全文收录在大会光盘中。这些文章荟萃了自上届马德里会议四年以来世界各国在水泥混凝土科学领域的研究动态、发展趋势和各种成果的精华。

大会论文集为水泥科学文献之极峰,历来传播广远,影响甚深。然则论文集篇目浩如瀚海,难窥涯岸。为使我国水泥混凝土领域更多的科技人员全面掌握本届大会论文集之最新技术进展和精髓内容,从中获得启迪,对未来开展研究有所裨益,大会秘书处特组织国内学术水平较高的专家学者组成编委会,系统归纳和

分析了各个专题的论文观点,编辑出版了《水泥与混凝土研究进展——第14届国际水泥化学大会论文综述》。

本书共分为7章,按照专题设置章节,每章的综述总结提炼了本专题所有论文的已有研究成果,并分析对比本专题国内外研究的差异,对未来研究方向和研究趋势做出展望,帮助国内读者多维度了解各专题之精华。

本书由姚燕担任主编。

主要编写人员:第1章:沈晓冬、张文生、崔素萍;第2章:王培铭、钱觉时;第3章:阎培渝、余其俊;第4章:孔祥明、王子明;第5章:王玲、李克非;第6章:程新、史才军;第7章:李宗津。

全书由李娟负责统稿和初审,由阎培渝、王培铭、钱觉时三位主审审定。

由于工作量大,时间仓促,论文涉及面广,各位专家在百忙之中抽出时间参与了这项工作,如有疏误之处,尚祈读者惠予指正。

编委会
2016年4月30日

目 录

第 1 章 水泥熟料化学	1
1.1 水泥生产工艺	1
1.1.1 替代性燃料	1
1.1.2 水泥熟料的绿色生产	2
1.1.3 水泥粉磨工艺	4
1.1.4 新型烧成工艺	5
1.1.5 熟料烧成工艺的优化与信息化	7
1.2 低碳水泥熟料	8
1.2.1 新型低碳水泥熟料	8
1.2.2 硅酸盐水泥熟料低碳生产	13
1.3 外来组分对水泥熟料的影响	13
1.3.1 外来离子对硅酸盐单矿的影响	13
1.3.2 外来组分对硅酸盐水泥熟料的影响	16
1.3.3 微量组分对其他熟料矿物体系的影响	20
1.4 水泥熟料测试新方法	22
1.5 其他	24
1.6 研究展望与分析	25
参考文献	25
第 2 章 硅酸盐水泥水化	28
2.1 硅酸盐水泥的水化机理	28
2.1.1 水泥单矿物的水化机理	28
2.1.2 矿物外加剂对水泥水化的影响机理	31
2.1.3 化学外加剂对水泥水化的影响机理	33
2.1.4 聚合物对水泥水化的影响	34
2.1.5 其他	34
2.2 硅酸盐水泥水化动力学与热力学	36
2.2.1 普通硅酸盐水泥水化动力学与热力学	36
2.2.2 复合水泥体系水化动力学与热力学	42
2.2.3 特种水泥水化动力学与热力学	43
2.3 C-S-H 的组成及结构	45
2.3.1 C-S-H 组成	45

2.3.2	C-S-H 微观结构与模拟	47
2.3.3	影响 C-S-H 微观形貌的因素	50
2.4	水化过程模拟	52
2.4.1	原子水平的模拟	52
2.4.2	微观和介观尺度的模拟	54
2.5	其他	57
2.5.1	水泥次要组分对水泥水化的影响	57
2.5.2	混合材对水泥水化的影响	59
2.5.3	外加剂对水泥水化的影响	61
2.5.4	养护条件对水泥水化的影响	61
2.6	研究展望与分析	63
	参考文献	64
第 3 章	辅助胶凝材料	70
3.1	引言	70
3.1.1	可持续的混凝土生产中辅助性胶凝材料的作用	70
3.1.2	材料性能评价	71
3.1.3	辅助性胶凝材料的制备与提高活性的外加剂	72
3.1.4	辅助性胶凝材料对于水泥水化及其性能的影响	73
3.2	辅助胶凝材料的组成、结构特性及其活性	73
3.3	辅助胶凝材料对水泥水化的影响	75
3.3.1	辅助性胶凝材料的性能	75
3.3.2	单掺辅助性胶凝材料对水泥水化的影响	76
3.3.3	复掺辅助性胶凝材料对水泥水化的影响	76
3.3.4	减水剂对复合水泥水化的影响	77
3.4	辅助胶凝材料对水泥基材料性能的影响	77
3.4.1	单一辅助胶凝材料对水泥基材料性能的影响	77
3.4.2	复合胶凝材料体系对水泥基材料性能的影响	83
3.5	其他	85
3.5.1	不同固体废弃物的利用	85
3.5.2	辅助性胶凝材料原材料的性质表征	88
3.5.3	辅助性胶凝材料在油井环境中的应用	89
3.6	研究展望与分析	89
	参考文献	90
第 4 章	混凝土外加剂	95
4.1	概述	95
4.2	流变性能调节外加剂	95
4.2.1	减水剂	95
4.2.2	增稠剂	104

4.2.3	流变学	105
4.2.4	多种外加剂的配合使用	108
4.3	凝结调节外加剂	108
4.3.1	缓凝剂及其缓凝作用机理	108
4.3.2	促凝剂及水泥混凝土凝结硬化的调控技术	111
4.4	强度发展促进外加剂	111
4.5	耐久性提升化学外加剂	116
4.5.1	引气剂	116
4.5.2	减缩剂	116
4.5.3	膨胀剂	117
4.5.4	养护剂	117
4.5.5	其他	119
4.6	聚合物乳液	119
4.7	无机纳米材料	122
4.7.1	纳米 C-S-H 粒子	122
4.7.2	纳米 SiO_2 和纳米 CaCO_3	122
4.7.3	石墨烯和碳纳米管	122
4.7.4	其他低维纳米材料	122
4.8	其他外加剂	124
4.9	研究展望与分析	124
	参考文献	127
第 5 章	混凝土耐久性	133
5.1	混凝土耐久性能的研究	133
5.1.1	抗氯离子渗透与钢筋锈蚀	133
5.1.2	抗冻性	140
5.1.3	抗硫酸盐侵蚀	142
5.1.4	抗碳化性能	148
5.1.5	碱骨料反应破坏	150
5.1.6	抗裂性能	154
5.1.7	其他耐久性	156
5.2	混凝土服役寿命预测及性能测试	163
5.2.1	多因素协同作用下的耐久性评价	163
5.2.2	混凝土结构耐久性评价及寿命预测	167
5.3	研究展望与分析	172
	参考文献	173
第 6 章	替代胶凝材料	179
6.1	碱激发胶凝材料	179
6.1.1	材料制备	179

6.1.2	组成优化	183
6.1.3	产物组成及反应机理	191
6.1.4	应用	194
6.1.5	结论与展望	195
6.2	新型低碳水泥	196
6.2.1	硫铝酸盐水泥 ^[84]	196
6.2.2	铝酸盐水泥	206
6.2.3	镁基胶凝材料	208
6.2.4	碳化材料	211
6.2.5	研究展望与分析	213
	参考文献	214
第7章	测试方法和标准	221
7.1	亚洲地区水泥品质标准和碳排放的计算	221
7.1.1	日本水泥行业标准	221
7.1.2	日本地区水泥材料生命周期的环境指标	222
7.1.3	中国水泥工业中 CO ₂ 的排放及计算	222
7.2	水泥净浆凝结时间、自由变形和化学收缩测量的局限和展望	224
7.2.1	温度对 Vicat 凝结时间的影响	224
7.2.2	终凝对自由变形的影响	224
7.2.3	综合测试	225
7.3	矿渣水泥烧失量的校正方法	226
7.4	水分在多孔骨料和水泥介质中的传输性研究	226
7.4.1	屈服强度研究	226
7.4.2	抗压强度研究	227
7.5	水泥中水溶性铬(VI)含量的参照材料的制备方法	227
7.6	硬化水泥净浆的显微硬度的测试	228
7.7	水泥标准的现状和发展趋势	229
7.7.1	硅酸盐水泥标准	229
7.7.2	复合水泥标准	230
7.7.3	展望	230
	参考文献	232

第 1 章 水泥熟料化学

水泥熟料化学和水泥生产工艺相对于水泥水化、替代性胶凝材料等研究领域，发展较早，形成的知识体系和工业架构相对完善。对于熟料矿物的大部分基础研究，如相图、熟料矿物相的反应热力学与动力学等研究热潮基本出现在 20 世纪中期。而水泥生产工艺也随着新型干法窑的普及而完成了水泥生产工艺的质的飞跃，使得现在的水泥窑能最高达到理论热效率的 80%。

但随着新的研究方法和手段（如计算机模拟）的应用和水泥熟料相关科学问题的吸引，围绕水泥熟料化学展开的基础研究依然吸引着研究人员在这一个领域开展探索。与此同时，水泥水化研究的深入也间接地推动了水泥熟料化学方面的研究。比如，大量使用替代性胶凝材料（混合材）被认为是水泥行业最为可行的可持续和低碳之路，这对熟料的早期强度提出了更高的要求，直接促进了含硫铝酸钙复合水泥熟料方面的研究工作。

另一方面，在温室气体排放造成全球气候变暖越演越烈的形势下，水泥工业在二氧化碳减排方面任重道远。在水泥熟料化学与制备领域，低碳主要体现在低碳水泥熟料的开发、熟料的低碳制备方面。本次大会报道了不少围绕低碳水泥进行的科学研究与工业应用探索，如协同处理固体废弃物、替代性燃料的使用等等。

本章主要以水泥熟料生产工艺和水泥熟料化学为主，介绍本届会议在科学研究、应用探索和工业技术等方面取得的成果。

1.1 水泥生产工艺

近几年，水泥熟料生产工艺技术的发展主要体现在协同焚烧技术、可持续水泥生产、高效粉磨系统和新型熟料烧成工艺这几个方面。虽然水泥熟料生产技术在发展，但是全球水泥窑的产能近几年的增速已经放缓^[1,2]。

1.1.1 替代性燃料

得益于大量使用替代燃料的协同焚烧技术的应用，熟料烧成和冷却工艺有较大的进步^[3,4]。熟料烧成的整体热效率已达最高理论热效率的 80%。考虑到熟料生产本身所需要的能耗，现有水泥生产工艺的能耗已经接近理论上限，所以很难再有大的突破。图 1-1 展示了德国单位水泥能耗组成情况。可见替代燃料是目前水泥低碳生产最具潜力，也是相对行之有效的方向。

实际生产中替代燃料的使用主要面临的问题是燃料中含有的水分和其成分的不均匀性，目前工业上主要是优化燃烧和预处理来提高其均匀性。燃料中的水分则主要通过粉磨干燥等技术来降低水分优化燃烧特性。计算流体力学模拟（CFD）等技术也被用来优化燃烧。与此同时，由于替代性燃料的使用，提高燃料的燃烧效率是另一个重点。主要使用以下几种方式来提高燃

烧效率：(1) 分离燃烧室和热解燃烧系统延长燃烧时滞留时间；(2) 富氧燃烧技术。

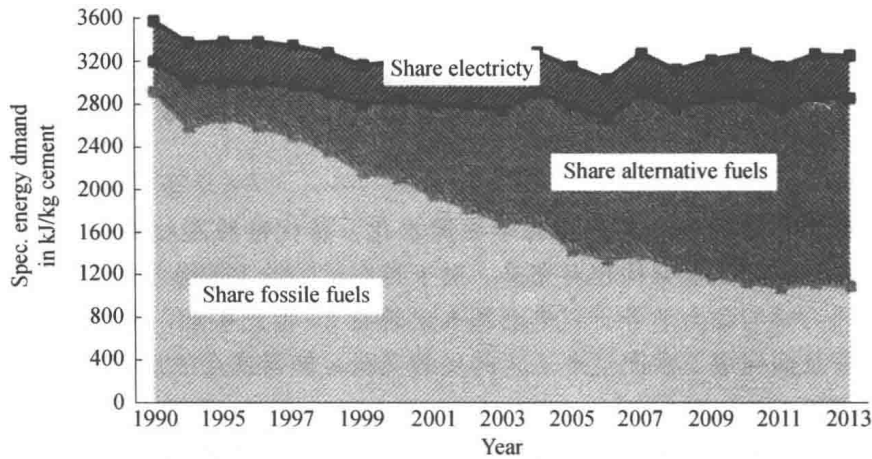


图 1-1 德国水泥工业单位能耗的发展情况^[5]

1. 1. 2 水泥熟料的绿色生产

水泥熟料的绿色生产方面，研究工作包括脱硝、CO₂ 捕获、重金属排放控制、水泥的再生利用及水泥窑协同处理固体废弃物等方向。

最新的脱硝工艺，包括选择性非催化还原反应和选择性催化还原反应技术，已经能极大地降低 NO_x 的排放。SNCR（选择性非催化还原）过程是基于在 850~950℃ 的温度范围里注入氨水或者尿素溶液来减少氮氧化物，该方法被广泛用于氮氧化物减排。但是这个过程可能会导致 NH₃ 排放的增加。因此出现了高效 SNCR 技术，降低了 NH₃ 排放，但是废气也更加难以被 SNCR 技术处理，从而制约了最终的减排能力^[6]。SCR（选择性催化还原）技术与 SNCR 技术基于相同的原理，但是 SCR 使用了催化剂使得所需反应温度为 250~400℃。欧洲的一些水泥厂通过工业示范项目来探索 SCR 技术在工业上的可行性，结果见表 1-1。

表 1-1 SNCR 和 SCR 减排 NO_x 的对比评估

技 术	评 估
高效 SNCR	成本比 SCR 低
	减排效率有限
	高 NH ₃ 排放风险
高尘 SCR	预热器后温度最佳，没有预热要求
	复杂度比低尘方案低
	含尘量高，对堵塞以及催化剂活性有潜在影响
低尘 SCR（窑尾）	含尘量低，小阻塞风险高，降低催化剂活性的风险低
	气体需重新加热
	相比于高尘 SCR，催化剂需要量少
中尘 SCR（用于特殊过程规定）	良好的成本/效益比
	需要高温 ESP
	相比于高尘 SCR，阻塞风险低
	相比于其他方案，经验少

CO₂ 减排主要是通过降低熟料系数和熟料烧成能耗来实现。水泥中大量使用替代性胶凝材料如粉煤灰、矿渣、火山灰和烧黏土等可以有效地降低水泥中熟料的使用量进而降低水泥的 CO₂ 排放。为进一步降低熟料生产的 CO₂ 排放,在熟料生产过程中使用替代性燃料和固体废弃物可以较好的达到目标。

水泥生产中的重金属主要来自原料和燃料。对于重金属汞,目前采取的措施是对汞排放监控,防止其在窑内富集。在高排放的生产线还要进行除汞的相关工作,比如通过在停窑期进行复杂的窑内温度控制来降汞。对于其他类的重金属的控制则可以参考热力学预测结果选择相应的处理措施:As、Cd、Hg、Sb、Sn 和 Tl 完全在气相中;Co、Cr、Mn、Ni 和 V 完全在浓缩相中;Cu、Pb 和 Zn 分布在气相和浓缩相中;气氛中氧气局部压力的变化会影响 Cu、Pb 和 Zn^[7]。

在水泥生产中,一方面要让排出去的气体、固体尽可能安全无害,达到相关排放标准。另一方面,如前文所述,要达到水泥生产的低碳,行之有效的方法则是向水泥生产过程中引入废弃物来降低熟料的烧成能耗和碳排放,如引入替代性燃料、固体废弃物等等。

有研究提出使用 NSP 窑处理废弃物的协同处置模型,进行对熟料质量影响的分析,窑操作条件分别在 20t/h、50t/h、80t/h 下输送预处理废弃物时的污染物排放的试验。结果显示:当输送废弃物的速率小于 80t/d,熟料的 28d 强度最多下降了 3MPa,符合国家标准。窑耐火涂料以及操作条件不受影响;在气流中二恶英的排放速率为 0.0040 ng TEQ/Nm³,显著低于国家标准的排放限制^[8]。基于实验室研究和工厂试验,利用 Zn 冶炼厂炉渣代替铁矾土生产熟料。掺入炉渣后窑炉运行平稳,矿渣的硬度不影响生料磨的生产能力。炉渣的掺入使得熟料中 C₃S 提高 2%~3%^[9],熟料性能与参比样相当(表 1-2)。

表 1-2 掺入 NFS 前后普通硅酸盐水泥(OPC)的物理性能对比

Sr.	Mineral composition (%)				Blaine (m ² /kg)	NC (%)	Setting time (min)		Compressive strength (MPa)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			IST	FST	1 d	3 d	7 d	28 d
Clinker without NFS												
1	57.14	23.30	2.50	17.01	328	28.0	125	160	24.3	42.1	51.8	63.3
2	55.00	25.03	2.18	17.79	287	28.5	135	180	21.5	39	47.9	59.5
Clinker with NFS												
3	49.16	24.69	1.83	15.8	251	26.5	140	180	22	38.7	47.6	59.7
4	55.78	25.63	1.13	17.06	292	28.5	130	160	19.7	37.6	46.8	58.1
5	60.95	21.11	0.84	15.6	321	27.0	145	185	23	42.9	54.7	69.5

研究发现废弃混凝土也可用来制备熟料。废弃混凝土在生料中比例超过 5% 时易烧性较差;超过 15%,C₂S 在熟料中含量增加;CaF₂ 可以提高含废弃混凝土再生水泥生料的易烧性,其最佳用量为 0.5%。HiCaAl₁₀ 中的氟和碱金属对水泥工业也是一种资源^[10]。掺杂 HiCaAl₁₀ 的 F 含量为 0.19%,Na₂O 为 0.41% 的熟料矿物组成为 Alite 65.7%,Belite 16.2%,C₃A 10.0%,C₄AF 7.3%,熟料具有较高的反应活性。工业试验结果表明,提高氟和碱的含量会促进熟料的反应活性,增强 3d 和 7d 的水泥强度(图 1-2)。

除此之外,对钙质粉煤灰和粒化高炉矿渣生产普通水泥进行了工业化试验^[11],研究了熟料能耗与碳减排方面的变化。在混合原料中加入 3%、4% 和 5% 的高炉矿渣(这些副产物分别有 25%~30% 和 40%~45% 的 CaO 含量)使得二氧化碳减排量为每 1000t 熟料 10.2~

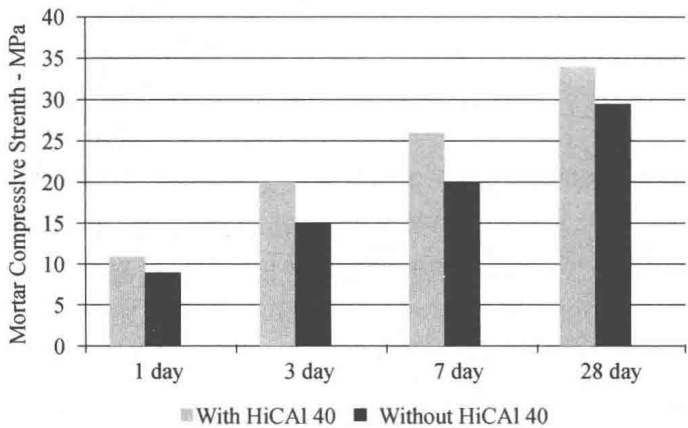


图 1-2 HiCAI₄₀ 对水泥砂浆强度的影响

12.8kg。在混合原料中加入 2% 和 3% 钙质粉煤灰的二氧化碳减排量为 11.1kg 和 23.5kg 每 1000t 钙质粉煤灰和电石渣，改善了生料的易烧性。更好的熟料易烧性和较低的碳酸盐含量理论上降低了煅烧过程中的能源消耗。工业测试表明，用钙质粉煤灰和电石渣加入生料对于熟料的水硬性没有显著的变化。钙质粉煤灰、电石渣、高炉矿渣等加入生料能够减少二氧化碳排放，减排量取决于这些非碳酸盐材料中 CaO 的含量。

1.1.3 水泥粉磨工艺

现代水泥生产中，熟料粉磨电耗在整个水泥生产中所占比例依然很高，粉磨过程约占 60%~70% 的熟料电耗^[12]。提高熟料粉磨效率、降低粉磨能耗依然是水泥行业节能减排的突破口。目前提高粉磨效率的方法是在熟料粉磨环节使用立磨，将熟料、混合材分开粉磨。

对于新建的生产线，立磨占主导，中国地区除外。但是对于已有的生产线，还以辊压机加球磨的方式为主导。而对于现有生产线而言，主要工作是升级现存的球磨系统，但是这一工作也是最有难度和挑战的。一方面是现存的球磨系统效率相对较低，但是其有稳定和操作简单优势。另一方面，升级粉磨系统后对熟料颗粒分度和细度带来的影响也会直接影响熟料的反应活性和后期性能，这也是在升级过程中要注意的地方。

由于水泥中不同组分本身的易磨性不同，这也是导致现有粉磨系统（主要为共同粉磨）难以优化的原因。基于此，近年来出现了熟料和混合材分别粉磨来提高粉磨效率的方法，如图 1-3 和图 1-4 所示。不同材料分别粉磨具

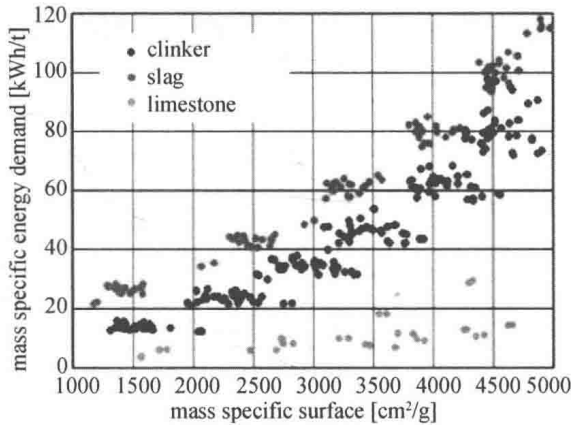


图 1-3 不同熟料、矿渣和石灰石样品的粉磨性能^[13]

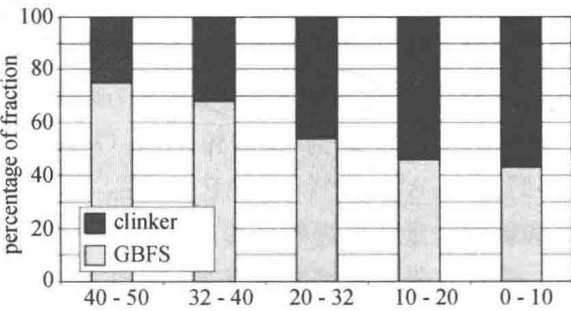


图 1-4 共同粉磨条件下矿渣粗颗粒在矿渣复合水泥中的富集^[13]

有高效、粒度可控性高等优势。磨好的原料混合制成水泥，这样生产上的自由度会有所提高。对于这一技术，目前急需解决的是其对水泥混凝土性能，特别是耐久性等方面的影响。

对粉磨机理和理论研究旨在为优化粉磨提供指导，这也是近年来粉磨领域的重点方向。理论研究认为现在普遍使用的粉磨系统的效率不但远低于理论值，而且比实验室得到的数据也要小得多。相信随着粉磨机理研究的深入，水泥粉磨效率应该还能在很大程度上有所提高。

1.1.4 新型烧成工艺

本次大会也报道了一些新型熟料烧成工艺，如 XDL（由徐德龙教授命名）新技术、溶液燃烧法、二次烧成阿利特硫铝酸钙水泥等。对比研究了溶液燃烧法和高温自蔓延法，证实了溶液燃烧法的优势^[14]。也有研究证明了在高铝水泥生产中使用等离子技术的可行性^[15]。

由徐德龙教授^[2]在 2003 年发明的新型 XDL 水泥熟料煅烧技术成功地将单位耗热量从约 3350kJ/kg（编者更正，原文为 7942kJ/kg）降低到 2839kJ/kg（图 1-5）。所以使用新技术来降低熟料煅烧的热耗是水泥生产中实现低 CO₂ 排放的一个重要方面。

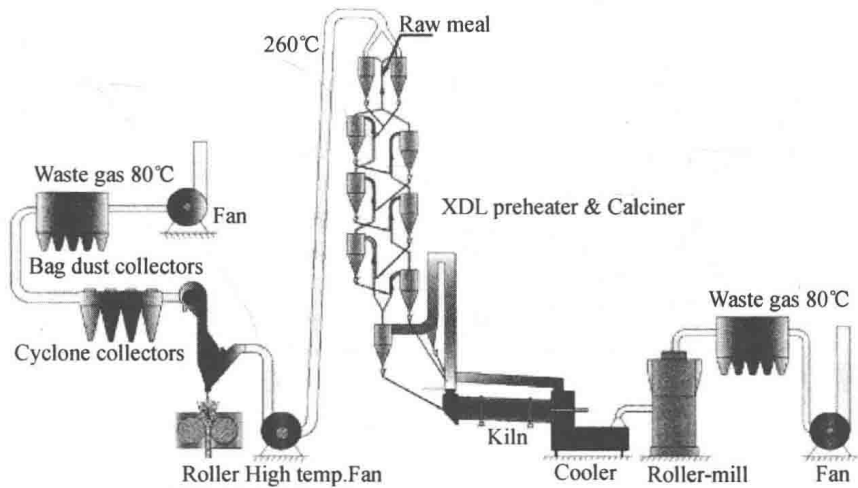


图 1-5 XDL 水泥熟料煅烧技术的废热利用图

XDL 新工艺与水泥熟料的普通干法悬浮预热和预分解工艺相比较，具有以下技术优势：第一，熟料煅烧、生料制备和矿物粉生产结合在一起，充分利用系统的余热。此外，单位熟料生产的综合热耗减少到 2366kJ/kg（表 1-3）；第二，考虑到高固气比预热器和外循环、高固气比分解炉、气体和固体的接触面积，以及传热和加热时间增加了一倍，所以热效率和窑中材料的分解率都显著增加，熟料产量增加了 40%，回转窑的单位体积输出可高达每天 5.890 t/m³（表 1-3）；第三，SO₂和 NO_x排放降低；第四，水泥熟料强度增加了 10%，并且可以灵活地使用劣质原材料。

表 1-3 对 XDL 水泥煅烧新工艺与传统 NSP 工艺之间的技术指标比较

项目	XDL 工艺	传统工艺	改变率 (%)
气相比比例 (固体质量 kg/气体质量 kg)	2	0.9	122
窑产量 (t/d)	3592	2500	43.68
耗热量 (kJ/kg·cl)	2839	3350	-15.25
系统热耗 (kJ/kg·cl)	2366	3078	-23.13