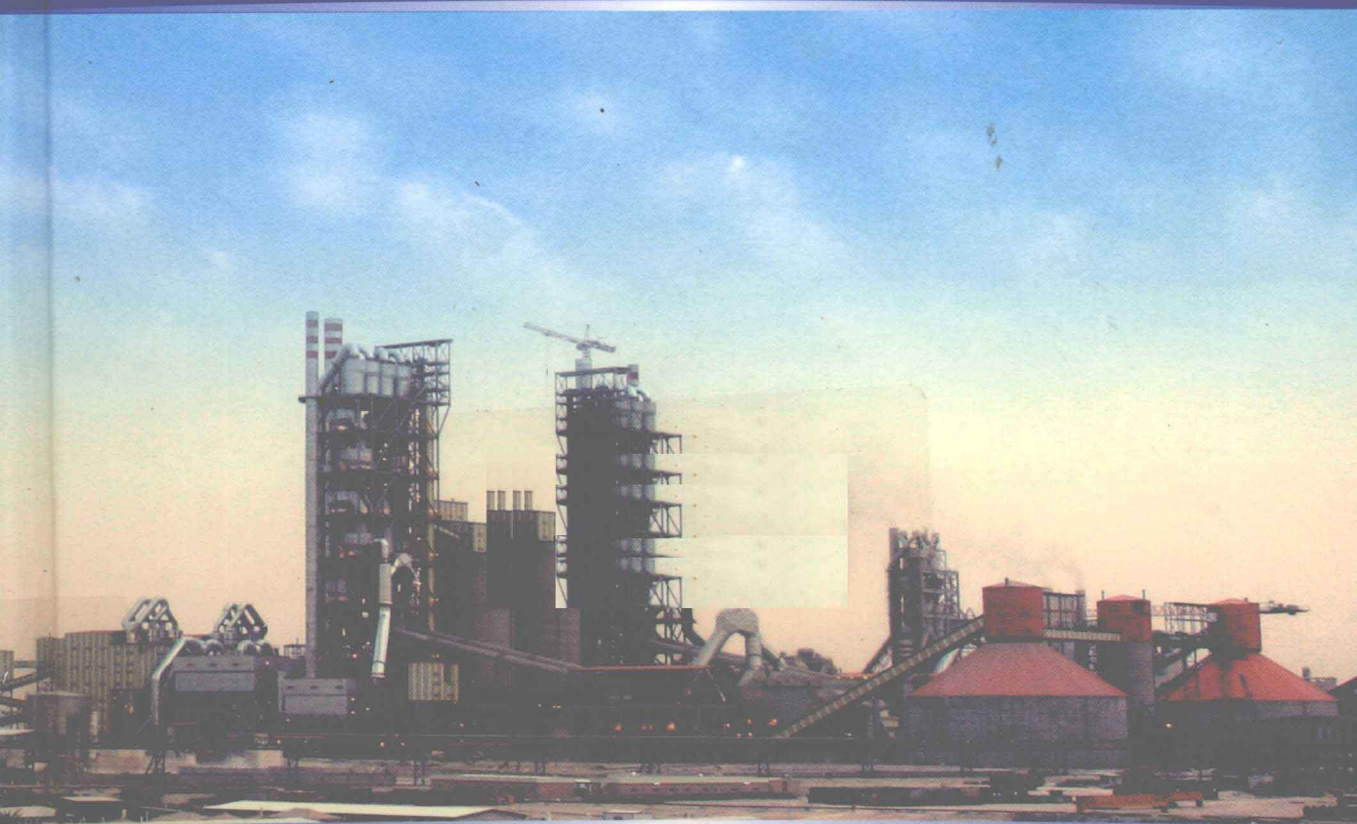


水泥工程技术与实践

SHUINI GONGCHENG JISHU YU SHIJIAN

蔡玉良 编著

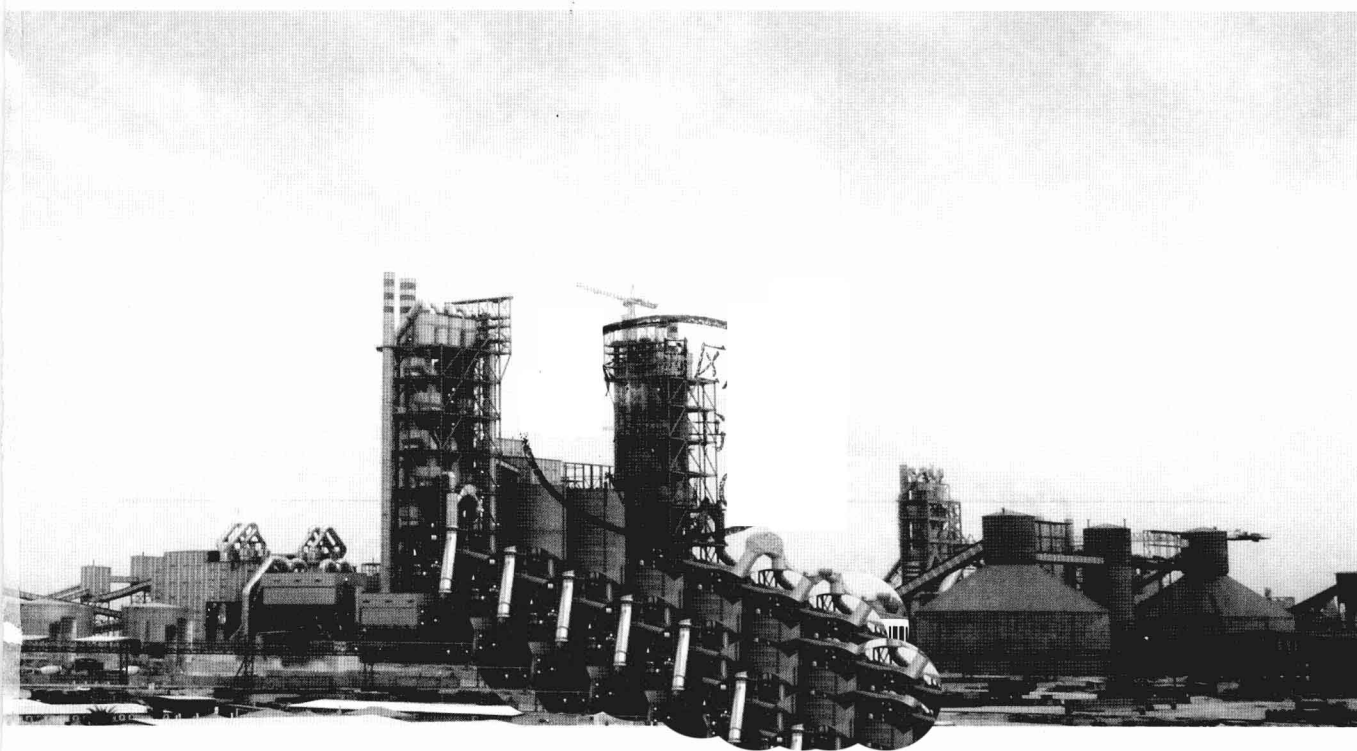


化学工业出版社

水泥工程技术与实践

SHUINI GONGCHENG JISHU YU SHIJIAN

蔡玉良 编著



化学工业出版社

· 北京 ·



改革开放以来，尤其是 21 世纪刚刚过去的十年，水泥工业经历了两个“飞跃”（产能和产业结构）和五个“转变”（生产技术和装备等），生产面貌发生了巨大的变化。人们在对比了过去的水泥厂和现代化的日产万吨级大厂，都会有“震撼”的感受。人们不禁要问：这种令人振奋的进步缘于何方？

阅读了这本文集，可以清晰地看到进步的脉络。正是像作者们这样一批老中青科技人员组成的一支支技术研发、生产与管理团队，不畏艰辛，夜以继日，用他们的汗水和智慧，揭示了水泥生产技术中的某些规律，提高了认识水平，掌握并开拓创新了某些核心技术，才使行业走出了长期以来引进、模仿和亦步亦趋国外技术的困境。

就内容而言，该书有如下特点。

第一，将水泥预热预分解技术从“技艺”逐步上升到“工程”的科学水平。应用现代化工理论，尤其是气固相之间的“三传一反”理论与水泥生产长期积累的经验相结合筛选了合理的过程模型；并充分利用已有的应用商业软件，通过学习、掌握、移植、嫁接，巧妙地加以链接，建立了预热预分解过程的专业性计算程序，体现了多学科的综合运用，从而提高了设计工作的“工程化”科学水平，为摆脱纯经验的“技艺”操作模式创造了条件。

第二，初步实现了优化设计，为创新之路打下基础。运用数学模拟计算，预测设计过程中各种参数的变化，为优化设计服务。改变过去固定原、燃料使用要求以适应系统需要的习惯做法，转化为拓展系统技术性能，以适应不同原、燃料的特性。如 NC 预热器和分解炉的开发以及燃无烟煤和难燃煤技术创新等。这些内容凸显出科学理论对生产实践的指导作用。

第三，拓宽了先进技术的适用规模。书中内容多来源于生产，成果理论性比较强，可合理放大，转化为生产力。如运用研究成果开发的 NC 预热预分解系列不同规模生产线等，其中不少日产 5000~10000t 熟料的项目已成功投入生产，并取得巨大经济效益和社会效益，在国内外承包项目中占据了很大的市场份额。

第四，前瞻性。该书集中介绍了如处理城市垃圾、节能减排、生物制能等技术，尤其是废弃物处理技术，这些内容对资源再利用和环境保护都有重要意义。该书还对未来水泥工业

将转化为以消纳社会各类废弃物和自身能源再开发为主、水泥产品为辅的生产模式进行了描绘，更具新意。

上述特点使该书具有较高的参考和借鉴价值。

除此之外，蔡玉良及其团队在研发工作中有一套规范、制度、要求、风气、习惯、传统等，在当前繁杂的氛围下他们能甘于寂寞、数十年如一日，长期拼搏在第一线。这种独特的“团队文化”也许是更值得赞扬的吧！

水泥行业还有诸多技术难题亟待解决，需要付出更大的努力，人们期待他们新的成果。

正所谓“成果累累，期望殷殷”，是为序。

胡道和

2011 年 12 月于北京



过去的十年，是我国水泥行业大变化、大发展、大进步辉煌的十年！

在国内，不仅水泥产能有了超常的增长（由 5.8 亿吨到 18.7 亿吨），而且在产业结构上也有了巨大的飞跃（新型干法水泥产能占总产量由 10% 上升到 80% 以上）。正是这两个“飞跃”，保证了十年间国民经济的飞速发展、GDP 的稳步增长，从而使我国的基本建设和人民生活也有了创历史的改观。作为基本建设主打的建筑材料，水泥功莫大焉！

在国外，由于我们服务方式的改变，而使水泥建设工程业务也打开了局面。近些年来，以中东地区为突破口，我们已为六十余个国家改造和建设了各种规模的水泥生产线（2000～10000t/d），至今已承揽国外水泥工程项目的生产线多达百条以上，其中半数以上已建成投产，并交付业主，得到了业主的赞誉并取得验收证书。在短短的十年间，中材料集团水泥工程总承包已在国际上树立了自己的品牌（Sinoma），并以技术可靠、建设周期短、成本低、技术指标先进等特点享誉世界，屡次在商业竞标中拔得头筹，已连续多年世界市场份额居全球首位。

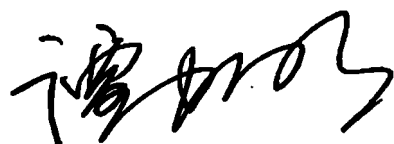
骄人的成绩来源于核心竞争力——具有自主知识产权的先进技术和优越的服务方式。

水泥工业技术的进步依赖于传承与持续创新，蔡玉良所带领的研发团队作为我国水泥行业年轻一代的重要主力军之一，在继承中创新、发展，做出了巨大的贡献，取得了卓越的成就。今天他们将具有代表性的成果整理出版，是一件大好事。

从论文主题分布来看，该书既包括了当代新型干法水泥生产核心技术的理论研究和实践内容，又涵盖了以水泥生产系统作为末端处置系统，接纳各类废弃物和城市生活垃圾技术的基础实验研究、装备开发等创新内容，符合当今节能、降耗、循环经济发展的要求；另外还总结了一些具体的技术研究方法与思路，并对我国水泥工业未来的走向和发展趋势做了一些畅想，想必会给行业内科技工作者和广大读者带来一些有益的启发和帮助。

当前，我国水泥工业又进入了新的发展阶段，未来水泥工业将转向以消纳社会各类废弃物和自身资源再开发利用为主、水泥产品为辅的生产模式。在以后的技术创新中，要以提高资源利用效率和环境保护、低碳经济为主线，使水泥工业的发展符合循环经济

原则和可持续发展的战略要求。为此，期望蔡玉良和他的研发团队，联同水泥行业的同仁们继续努力，在水泥工业系统优化、节能、降耗、内外部资源的开发利用和提高资源利用率等方面，创出新路子，为推动我国水泥工业向生态友好型和污染物控制型工业的转变提供有力的技术支持。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王一鸣' (Wang Yiming), written in a cursive style.

2011 年 12 月于北京



前言



21 世纪之初的十年,是我国水泥工业飞速发展的十年,无论在水泥产能和产业结构,还是在水泥生产技术及其装备上均发生了翻天覆地的变化。

在水泥产能和产业结构调整方面:十年里新型干法水泥产能由 2000 年不到 0.55 亿吨(当年全国水泥总产量约 5.8 亿吨)提高到 2010 年的 15.8 亿吨(当年全国水泥总产量约 18.7 亿吨),平均每年约以 40% 的速度增长(全国水泥总产能每年以 12% 的速度增长),使得新型干法窑的产能从十年前占总产量的 10% 提高到当前的 80% 以上;水泥产业结构从过去以立窑生产为主到以新型干法窑生产为主,实现了产能与产业结构调整的双飞跃。

在生产技术和装备方面:十年里实现了从技术引进、消化、吸收、仿制到独立研发、集成、创新的“工程化”转变;从资源适应型到系统适应型、从局部优化到全局优化设计理念的转变;从简单复制、套用到有针对性的个性化快速设计方法的转变;从选择性资源利用到资源合理搭配以提高资源利用率观念上的转变;从自身环境指标控制到步入循环经济增强社会环境控制能力的转变。

在技术服务管理方式方面:十年里实现了从单一化工程设计服务到工程总承包服务管理方式的变化和从满足国内需求到大规模高端技术输出国外市场的变化,实现了国内先进到国际领先的目标要求。

十年跨越式大发展中的每一点进步,无不凝聚了老一代人为之精心策划,无私奉献;中年人为之奋勇攀登,开拓创新;年轻人好学钻研,传承发扬所付出的智慧和汗水。为了巩固现已取得的成果和地位,我们必须坚持不断地在系统优化、节能、降耗、提高环境控制能力、合理利用外部资源和开拓自身资源利用等方面,继续开创新局面,走出水泥工业科学发展的新路子。随着我国大规模基础设施建设的完成和将来的减缓,未来水泥工业的功能和目标将会发生转移,即以水泥为主要产品的生产模式转化为以消纳社会各类废弃物和自身资源开发利用为主、水泥产品为辅的生产模式。

本人有幸经历了我国水泥工业技术从引进、消化、吸收、仿制、改进、完善、提高到独立研发、集成、创新、形成自主知识产权技术的全过程;也和众多水泥业界的同仁一样,在

技术研发、设计、工程建设、生产、管理等方面为该领域的发展做了一些有益的工作。但是我更为有幸的是在踏上工作岗位之前，遇到了引领我进入行业之门的胡道和教授以及那些循循善诱、诲人不倦的老师，是他们为我充实了步入社会的资本，使我跨上了一个高起点的工作平台，有机会得到行业内许多资深领导和一流专家的指点与教诲；在后来的工作中又有幸遇到了一个高瞻远瞩、支持创新的领导团队，是他们的信任和呵护，使我能有一个良好的工作氛围；在具体的工作过程中，又遇到了一群敢于吃苦、乐于奉献的同事，使我所在的团队稍稍有了一些成绩。近来在领导和同事们的多次鼓励下，我将过去 20 多年来团队的奋斗“足迹”编排整理、集结成册，献给共同见证过这一过程的同仁们，同时也希冀能为继往开来者提供一些有益的参考。

经筛选本书收集了论文 80 余篇，分成如下三个主题：

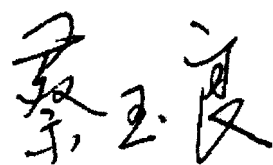
第一，新型干法水泥烧成系统的理论及实践；

第二，废弃物资源化利用，从观念创新、基础实验、装备开发等方面，阐述了利用新型干法水泥窑协同处置废弃物的研究成果。

第三，水泥工程设计理念与技术创新的思考。

本书在整理过程中，得到了我的导师胡道和教授的大力支持和多次指教，她在忍受病痛的情况下通读了稿件，不仅提出了许多建设性的修改意见，并为之欣然提笔，浓情作序。中材料集团谭仲明董事长在百忙之中抽出宝贵的时间，为文集的出版写了序言，给予了很高的评价。在此感谢以谭仲明董事长为首的集团和公司领导给予的关心、支持和鼓励；感谢与我朝夕相处的同事们，是他们与我共同完成了一项项生产任务，才留下了这些印迹。

由于时间的关系，书中存在不妥和不足之处，希望读者给予指正。

A handwritten signature in black ink, reading '樊玉良' (Fan Yuliang). The characters are written in a cursive, flowing style.

2011 年 11 月于南京



第一部分 水泥新型干法烧成系统的理论与实践

1

第一篇 基础研究 3

预热器系统分离效率参数分布的探讨	蔡玉良	4
旋风预热器结构优化设计的探讨	蔡玉良	9
窑外分解窑系统技术参数的反求	蔡玉良 张有卓 胡道和	16
4000t/d 带流化分解炉窑系统参数模拟研究	蔡玉良 王 伟	24
流化分解炉冷模实验研究	蔡玉良 王 伟 王超群 郑启权 王文平	30
流化分解炉内部热态过程的计算及分析	蔡玉良 王 伟	40
旋风预热器分离效率的间接测定与估算	蔡玉良 苏姣华	52
无内筒旋风筒的性能研究	宋海武 蔡玉良 黄义大 李建华	59
数据处理方法对无烟煤燃烧动力学参数求解结果的影响	汤升亮 蔡玉良 俞 刚 董益名	65
原燃料特性对烧成热耗的影响分析	潘立群 蔡玉良 许 刚	74
氧化镁对水泥熟料煅烧和水泥水化的影响	贺 烽 蔡玉良 陈 蕾	79
生料中各成分的颗粒细度对熟料烧成质量影响的实验分析	李 坤 贺 烽 成 力 董益名 蔡玉良	86

第二篇 数值模拟分析研究 92

对邝江型五级预热器系统热效率的研究	王 伟 蔡玉良	93
预分解系统单体模拟与实践应用	蔡玉良 丁苏东 叶旭初 胡道和	103
喷旋管道式分解炉内燃烧和分解过程的 CFD 模拟研究	叶旭初 李祥东 刘 民 蔡玉良 丁苏东	115

数值虚拟实验在水泥烧成系统技术创新中的应用						
.....	丁苏东	蔡玉良	潘 洞	孙德群	122	
烧成系统旁路放风装置的过程研究与开发设计						
.....	丁苏东	蔡玉良	潘 洞	孙德群	131	
立磨机内部气固两相流的模拟分析						
.....	朱永长	陈 翼	吴建军	刘志国	戴世民	蔡玉良 142
卧式旋风筒的数值模拟分析		宁建根	蔡玉良	丁苏东	吴建军	147

■ 第三篇 减排技术过程研究 154

水泥工业二氧化碳减排及资源化技术初探	蔡玉良	汤升亮	卢仁红	155			
燃料氮在高温悬浮态反应生成 NO 的特性研究	肖国先	蔡玉良	吴建军	董益名	163		
低 NO _x 型分解炉内部过程的数值模拟研究	丁苏东	孙德群	蔡玉良	169			
预分解系统分级燃烧技术的数值模拟和工程脱氮效果实验研究	吴建军	蔡玉良	嵇磊	于洋	丁苏东	俞刚	178
水泥窑燃用少量水煤浆降低 NO _x 尝试性实验研究	嵇磊	蔡玉良	吴建军	朱忠民	于洋	189	

■ 第四篇 工程实践 196

淮海水泥厂预热器系统局部结构改造	蔡玉良	197
立筒预热器技术改造的意见	蔡玉良 王 伟	201
白马山水泥厂再改造工程介绍	蔡玉良	210
2000t/d 超短窑烧成系统的操作	蔡玉良 赵小亮 杨德建	217
英德水泥厂 5 号窑生产质量控制与分析	蔡玉良	223
5000t/d 烧成系统的开发设计及技术指标控制		
.....	蔡玉良 孙德群 潘 洞 郑启权	229
铜陵海螺 5000t/d 烧成系统的技术配置与运行情况分析		
.....	蔡玉良 潘 洞 郑启权 孙德群	257
NC 系列窑系统热工测定的技术实践		
.....	陈汉民 蔡玉良 丁苏东 杨学权	268
燃无烟煤及其他难燃煤工程技术的开发设计与应用实践		
.....	蔡玉良 潘 洞 孙德群 丁苏东 李 波	277
涡流空气选粉机分级性能模拟预测与实践结果比较		
.....	陈 翼 蔡玉良 肖国先 吴 涛	296

第一篇 工艺过程研究 305

预分解系统技术在环保工程中的应用	孙德群 蔡玉良 陈汉民 潘 洄 郑启权	306
用预分解技术处理工业废渣的热化学过程分析与实践	潘 洄 蔡玉良 杨学权	314
城市垃圾减容化和资源化的一种有效途径	杨学权 蔡玉良 马祖生 成 力 邢 涛 陈汉民	321
利用水泥回转窑处理城市生活垃圾	辛美静 杨学权	331
利用新型干法水泥窑系统处置城市垃圾	蔡玉良 杨学权 辛美静	336
利用水泥生产技术处置城市生活垃圾的经济运行过程分析	蔡玉良 辛美静 杨学权	341
利用新型干法水泥生产技术处置城市生活垃圾的基本操作与控制模式分析	蔡玉良 杨学权 辛美静	349
循环经济视角下水泥工业和垃圾处理产业的“双赢”选择	胡晶琮 江可申 蔡玉良	367
利用水泥烧成系统处置城市废弃物应该注意的问题	辛美静 杨学权 李 波 赵 宇 蔡玉良	374
加速配套制度建立 推进水泥工艺处理城市生活垃圾的进程	辛美静 蔡玉良 杨学权	383
利用水泥窑协同处置城市生活垃圾技术	蔡玉良 杨学权 辛美静 李 波 赵 宇	388

第二篇 基础实验研究 400

城市生活垃圾中重金属对水泥性能的影响	辛美静 杨学权	401
利用水泥回转窑处理城市生活垃圾时重金属渗滤性研究	辛美静 蔡玉良 杨学权	410
水泥窑处置废弃物中重金属迁移行为的研究进展	李 波 蔡玉良 辛美静 杨学权 成 力 王 君	419
水泥窑处置城市生活垃圾后续产品中重金属的浸出迁移性研究	李 波 蔡玉良 杨学权 辛美静 成 力 王 君 张 媛	426
不同 pH 值浸取液对重金属长期浸出行为的影响	李 波 王 君 杨学权 辛美静 蔡玉良	433

养护时间对水泥制品中重金属浸出特性的影响	王 君 李 波 杨学权 辛美静 蔡玉良	441
城市生活垃圾中主要可燃组分的热解及燃烧特性研究	辛美静 董益名 蔡玉良 陈 蕾 徐 磊 成 力	449
水泥窑焚烧生物质资源过程中产生焦油的研究	赵 宇 徐 磊 王 君 董益名 成 力	456
城市生活垃圾中有机质产气及焦化特性研究	辛美静 赵 宇 董益名 陈 蕾 蔡玉良	461
利用水泥窑处置城市生活垃圾预处理过程中发酵抑制及除臭解决方法	赵 宇 徐 磊 杨学权 辛美静 蔡玉良	466
水泥厂处置城市垃圾时渗滤液的处理	辛美静 赵 宇 杨学权 蔡玉良	473
水泥生产过程中特殊原燃料使用对耐火材料与设备腐蚀问题	俞 刚 蔡玉良 李 波 赵美江 杨学权 辛美静	481
城市生活垃圾成分及其波动对水泥窑的影响分析	陈 蕾 杨学权 辛美静 潘立群 蔡玉良	494
利用水泥回转窑焚烧处理污泥过程中污泥挥发性有机物成分的分析研究	赵 宇 蔡玉良 洪 旗 潘 洄	499
复分解反应中添加剂对轻质碳酸钙颗粒形貌的调控	冯冬梅 蔡玉良 戴佳佳 汤升亮	507

第三部分 技术装备过程开发研究 513

喷雾器的开发设计及其在水泥工业中的应用研究	蔡玉良	515
滚筒筛内物料运动过程的分析	蔡玉良 杨学权 丁晓龙 翟东波 赵美江	528
生活垃圾重力分选机的开发计算	杨学权 蔡玉良 陈 蕾 丁晓龙 穆加会 赵美江	534
可燃替代燃料煤粉燃烧器的数值模拟研究	宁建根 吴建军 蔡玉良 辛美静 杨学权 潘立群	541
5000t/d 熟料水泥生产线分解炉燃油燃烧器设计开发	刘志国 蔡玉良 肖国先 孙德群 陈汉民	548
NC 型第四代篦式冷却机结构特性及过程控制模型研究	刘 渊 蔡玉良 孙德群 官 绚 胡步高	554

反求工程方法在水泥工业中的应用

..... 胡道和 李昌勇 周 迈 王 伟 蔡玉良	567
流化分解炉热态技术分析及系统的最佳配合	蔡玉良 王 伟 579
中小型烧成系统开发设计的特点及理论基础	蔡玉良 585
预分解系统开发研究与设计方法的探讨	蔡玉良 595
新型预分解系统的研究开发和设计特点	王 伟 蔡玉良 609
旋风预热器系统组合性能的研究	王 伟 蔡玉良 618
湿磨干烧工程中的理论与技术创新活动	蔡玉良 陈汉民 628
非线性规划在水泥工业工程设计中的应用	蔡玉良 638
世界水泥工业科技发展现状和趋势	陈汉民 蔡玉良 刘东霞 652
对水泥工程技术研发设计理念及其变化的思考	蔡玉良 658
水泥工业与生物能源生产及应用技术初探	
..... 蔡玉良 俞 刚 赵 宇 杨学权 辛美静	663
中国水泥工业的畅想曲	胡道和 蔡玉良 669

第五部分 英文论文 677

Back calculation of technological parameters for PC system

..... Cai Yuliang, Zhang Youzhuo, Hu Daohe	679
Multi-objective decision making method in dynamic interactive decision support system	Zhang Youzhuo, Cai Yuliang, Hu Daohe 687
The calculation and analysis on hot state process of the fluidized calcining furnace.....	Cai Yuliang, Wang Wei 692
Analysis of basic operation and control model when disposing MSW by new precalciner production line	
..... Cai Yuliang, Xin Meijing, Yang Xuequan	703
The co-disposing technology of municipal solid waste by new precalcining kiln system	Cai Yuliang, Yang Xuequan, Xin Meijing, Li Bo, Zhao Yu 727

第一部分

水泥新型干法烧成系统的理论与实践

第一篇 基础研究

预热器系统分离效率参数分布的探讨

蔡玉良

纵观当前水泥工业中预热预分解工艺研究领域，探讨比较多的是以下三个方面的课题：

- ① 热力学方面的研究（气固换热及反应的效率和可行性问题）；
- ② 动力学方面的研究（气固换热及反应的速率问题）；
- ③ 高温设备单体工作机理的研究（设备结构的合理性问题）。

对于系统的性能研究，因其动态变化因素复杂，难度较大，目前国内研究者不多。以系統工程观点来看，在满足生产工艺要求及单体合理设计的基础上，研究各单体的组合特性或者对已知的组合系统，探讨最优的操作状态是非常必要的；不考虑组合系统的最优，只一味追求单体的最优，往往达不到最终的目的。为了适应水泥工艺发展的需要，开展这方面的工作，探索一条预热器系统组合性能研究的路子，显得非常必要。为此，本文根据某些引进厂的预热器系统的结构特点，以系统的技术经济指标为目标函数，采用非线性规划、函数的映射变换及系統工程的理论，探讨系统的分离特性对其压降、热效率的综合影响，以求为实际工程系统的设计提供理论参考。图1所示为两种4000t/d双系列四级预热器系统流程。

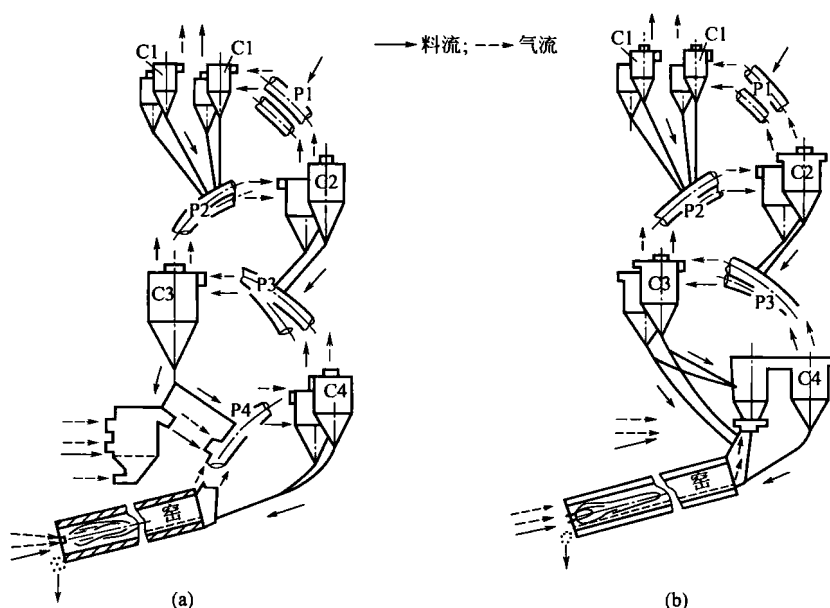


图1 4000t/d双系列四级预热器系统流程示意