

高长明 编著

预分解窑水泥 生产技术与进展



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

预分解窑水泥生产技术与进展

高长明 编著

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

预分解窑水泥生产技术与进展/高长明编著. —北京:
化学工业出版社, 2005. 11

ISBN 7-5025-7865-X

I. 预… II. 高… III. 水泥-生产工艺 IV. TQ172.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 132525 号

预分解窑水泥生产技术与进展

高长明 编著

责任编辑: 常 青

责任校对: 凌亚男

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市海波装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 20 $\frac{3}{4}$ 字数 500 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7865-X

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序 (一)

进入新世纪以来的短短几年中,随着国民经济的快速发展,我国的新型干法水泥技术在预分解窑节能煅烧工艺、大型原料均化、节能粉磨技术、自动控制技术和环境保护技术等方面,从设计到装备制造都取得了重大突破,已经达到或接近世界先进水平,技术装备基本实现大型化、国产化和低投资;装备国产化率已超过 90%。随着单位生产能力投资额的大幅降低,近几年我国新型干法水泥生产线建设呈现迅猛发展的势头。2004 年新投产新型干法水泥生产线 143 条,熟料生产能力为 12995 万吨,比上一年增长 67.9%。其中,2000t/d 及以上规模占 90%,5000t/d 以上规模占 48.1%,代表世界最先进、最大规模的 10000t/d 生产线 4 条。截至 2004 年底,我国已拥有新型干法水泥生产线 499 条,熟料生产能力达到 32884 万吨,生产能力居世界第一。

水泥预分解技术是最具现代化、规模化的水泥生产方法,在世界各国被普遍采用,成为当代水泥生产方式的主流。该技术以悬浮预热和预分解为核心,利用现代流体力学、燃烧动力学、反应动力学、热工学、计算流体力学-数值预测技术、粉体工程学和工程测试技术等现代科学理论和技术,并采用计算机信息及网络化技术,具有高效、优质、节能、节约资源、利废等特点,符合可持续发展的要求。

但是,目前我国以立窑为主的落后工艺生产的水泥仍占水泥总产量的 60%,水泥行业产业结构调整任务依然十分艰巨。这同时也说明,我国新型干法水泥的发展空间还很大。实践也证明,新型干法水泥生产线以其能耗低、质量稳定、规模化生产、自动化水平高、生产效率高、资源综合利用好、环境污染少、大幅度降低熟料和水泥的生产成本等优势,已经越来越得到投资者的青睐。可以预见,在今后较长一段时期内,我国新型干法水泥将保持稳定的发展态势。预计到 2010 年,预分解技术将成为我国水泥生产工艺的主体,届时,由该工艺生产的水泥将占全国水泥总产量的 70% 以上。

新型干法水泥生产技术的普及和发展,需要一大批高素质的专业人才。高长明先生编著的《预分解窑水泥生产技术与进展》一书系统、全面地介绍了新型干法水泥生产技术,为水泥行业科技工作者提供了一本很好的教科书。

高长明先生,1955 年毕业于南京工学院化工系水泥工艺专业,是新中国自己培养的第一届水泥专业大学生,从事水泥工业科研、设计、管理、技术

咨询、国际合作等工作 50 年，尤其是在掌握了国际上水泥技术发展动态的基础上，不断介绍国外先进的水泥技术和装备，为我国水泥工业的技术进步做出了贡献。高长明具有深厚的理论基础和丰富的实践经验，在国内外知名的水泥刊物上发表有关预分解窑水泥方面的文章近 200 篇，从中筛选出一部分文章汇编成集，可以说这部书不仅是高长明先生半个世纪学术生涯的成果，从中也可以看到我国水泥预分解技术的发展缩影。本书中，高长明先生详细地论述了国内外水泥生料均化链、节能的粉磨技术和设备、预分解窑系统，对现代化水泥厂的技术水平进行了分析，同时从国际先进水平的高度和视野，对我国水泥工业的实际状况进行了较为全面的剖析，提出了我国水泥工业必须坚持可持续发展的观点，具有一定的前瞻性和指导性。

可以预料，该书的出版发行，必将受到从事水泥科学和工程技术研究、设计、教学人员以及生产技术人员关注和欢迎，也必将对我国新型干法水泥事业的发展起到促进作用。

我国人口众多，资源相对不足，环境承载能力较弱，资源、能源对于经济发展的瓶颈制约日趋凸显。面对人口不断增加、资源约束突出、环境压力加大的严峻挑战，党中央提出了坚持科学发展观、发展循环经济、建设节约型社会的战略。作为资源、能源消耗大户的建材工业，转变经济增长方式，加快发展先进生产力，是必然的选择。对于水泥行业而言，加快发展代表水泥工业先进生产力的水泥预分解技术，是水泥行业可持续发展的必由之路。

谨作此序，以示对编著者的祝贺。

中国建材工业协会会长

张人为

2005 年 9 月

序 (二)

近几年我国新型干法水泥工艺与装备技术水平迅速提高,投资成本大幅下降。我国新型干法水泥占水泥总量的比重从10%多一点上升到40%,国产化、大型化、低投资、节能降耗、环境保护等目标都在一一实现。中国水泥工业出现了快速结构调整的良好局面。

不仅如此,我国水泥工程建设服务业利用其掌握核心技术、能自主提供大型成套技术装备和实力雄厚的工程设计工程管理力量等综合优势,快速进入国际市场。仅中材国际最近一年签订的国外总承包水泥生产线就有八条,规模以5000t/d和10000t/d等大型超大型熟料生产线为主。

我国水泥预分解技术的发展和新型干法水泥生产技术及装备的成熟经过了几十年艰苦探索的过程,凝聚了大批科研和工程技术人员的辛勤劳动。

高长明先生是我的校友、学长,我读过许多他的著作,颇受启迪。长明先生学贯中西,思维敏锐,其文章厚重前瞻,他所提出的水泥工业可持续发展战略的“四零一负”理念在实践中得到国内外水泥界的认同,现今在德国和北欧诸国已取得显著成效。长明先生对我国水泥工业进军国际市场具有强烈的责任心和使命感,积极主动地向我国大型水泥和工程集团中肯谏言,充分体现了一位老专家对我国水泥工业的心愿和期望。

高长明先生的《预分解窑水泥生产技术及进展》一书不仅包括了具体工艺和装备技术的研究,更有很多全局性战略性问题的剖析和远见,它的出版必将受到欢迎,是一件很有意义的事情。由此我还想到我们肩负的发展中国水泥工业和进军国际市场的使命,只有雄心和勇气还不够,我们应当加强科研和技术开发工作,提倡潜心研究,创造有利于技术不断进步的环境。期待还有这样的书出版。

中国材料工业科工集团公司总经理

谭仲明

2005年9月

前 言

自从 20 世纪 80 年代中期以来,我国的水泥产量就一直名列世界首位,然而其生产技术与装备水平的发展却长期处于滞后状态。水泥工业的技术含量很低,预分解窑水泥的比例太少,窑型结构亟须调整。在原国家建材局的正确领导下,经过全国各大水泥设计院、水泥研究院、水泥机械制造厂、装备安装公司、大型水泥集团以及大型水泥工程公司等多年坚持不懈的努力,2000 年开始,借助我国宏观经济持续高速发展的拉动,我国水泥工业终于激发了一个质的飞跃,预分解窑水泥技术掀起了一股巨大的发展浪潮。预计到 2005 年底,全国已建成投产的 $700\sim 10000\text{t/d}$ 的预分解窑熟料生产线总计将达 562 条,相应的水泥年生产能力达 4.4 亿吨左右。2005 年预分解窑水泥的产量预测将达 4.05 亿吨,占总量 38.6%。由此,最近 5 年之内,我国预分解窑水泥的从业人员就新增了约 15 万人,其中大部分是各方面素质要求较高的经营管理者、工程师和技术工人。随着水泥工业进一步的结构调整,预分解窑水泥在我国的普及与发展,这方面的人才需求将会不断增长。为了适应这种需求,帮助现有人员提高他们对预分解窑水泥的技术和管理水平,提高水泥专业大学生和硕士生的教学效果,在建材行业领导的鼓励与支持下,作者特将潜心研究多年的有关水泥工业发展的新思路、新理念,以及主要的科研成果重新整理编著成书;同时也是作者从事水泥事业 50 年,在这些方面的一个阶段性总结。谨以此书献给正在“由大变强,靠新出强”的中国水泥工业。

本书涵盖了预分解窑水泥技术五个部分的内容:水泥生料均化链及其装备;先进的粉磨技术与装备;熟料煅烧的预分解窑系统;国际国内水泥生产技术述评与展望;水泥工业可持续发展战略及实践。这些主题都是在国际先进水平的视野内,结合我国水泥工业的实际情况进行分析研究,阐明观点,作出论证的;同时对我国水泥工业的结构调整,做大做强做先,面对全球化的挑战和机遇等,倾注了殷切的期待和关注。

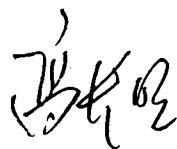
作者在本书中所表明有关国内国际水泥工业的各种观点,完全是个人看法和分析,而且纯粹是以客观性、技术性、学术性为依据的。本人充分尊重不同的学术主张或技术观点,欢迎批评指正;并且坚信实践是检验真理的唯一标准。我要真诚地向大家学习,特别是要向年轻一代的后起之秀们学习,激励自己坚持终身学习的理念和实践,学无止境!

本书是笔者针对国内外现代水泥工业技术发展进程的多年研究之力作，是一本较为实用的关于我国水泥生产技术与管理工作方面的专题文集，可供从事水泥及相关行业生产、科研、设计、管理等工作的高级管理人员和科技人员，以及大中专院校水泥专业师生阅读参考。

这里，作者特别要感谢全国政协环境与资源委员会副主任、原国家建材局局长、中国建材工业协会会长张人为先生，中国材料工业科工集团公司（Sinoma）总经理、博士生导师谭仲明先生分别为本书作序，作者深受鼓励。也谨向整理书稿电子版的中国水泥协会新型干法水泥研究分会《新世纪水泥导报》编辑部，以及支持本书出版的《中国建材报》、《中国建材》、《中国水泥》、《水泥》、《水泥技术》、《水泥工程》、《新世纪水泥导报》等杂志表示衷心谢意。

谨将此书献给正肩负重任要把我国建成世界水泥强国的年富力强的新一代同仁们，相信您们一定能完成这一光荣的历史使命！

同时也将此书献给与我风雨同舟投身新中国水泥事业 50 载的夫人。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '张人为' (Zhang Renwei), written in a cursive style.

2005 年 10 月于北京

内 容 提 要

本书分五个部分针对国内外现代水泥工业技术的发展进程,进行了深入系统的分析研究。一是生料均化链及其装备,全面阐述了生料均化系统的基本概念及各种堆取料机和充气搅拌装置的特点与选型;二是先进的粉磨技术及装备,重点论述了辊压机和立式辊磨的优点及其粉磨系统的优化配置;三是熟料煅烧的预分解窑系统,对预热器、分解炉、回转窑、篦冷机和燃烧器等主要烧成装备的设计操作参数做了实用详细的介绍;四是全方位、多视角对国际国内水泥生产技术水平进行了述评与展望;五是论述了水泥工业可持续发展战略及实践,着重论证了“四零一负”战略及其成效和预测,并论及了循环经济和建立节约型社会等课题。

本书内容翔实丰富,深入浅出,可供从事水泥生产、设计、科研工作的科技人员和管理人员等阅读,也可供高校相关专业师生和相关领域科技及管理人员阅读参考。

目 录

第一部分 水泥生料均化链及其装备

文 1	论现代化水泥厂的生料均化系统	3
文 2	论中小型水泥厂的生料均化系统	16
文 3	一种新型储存库——球拱形储库	23
文 4	再论生料均化链的基本概念	25

第二部分 先进的粉磨技术与装备

文 5	辊压机粉碎机理及其工艺参数选择	35
文 6	辊压机粉磨系统的应用	40
文 7	辊压机终粉磨系统对水泥性能的影响	47
文 8	辊压机系统在水泥生料粉磨中的应用	53
文 9	辊压机水泥粉磨系统的新进展	61
文 10	水泥(矿渣)粉磨技术的进展及选择	68
文 11	立式辊磨的新发展——用于水泥与矿渣的微细粉磨	75
文 12	立式辊磨在矿渣及水泥微细粉磨中的应用	78
文 13	立式辊磨——现代水泥工业中的首选粉磨设备	83
文 14	国际水泥工业粉磨技术发展概论	86

第三部分 熟料煅烧的预分解窑系统

文 15	熟料烧成系统的技术进展	97
文 16	可燃废料在水泥工业中的处置与循环利用	102
文 17	水泥工业烧二次燃料的 BAT(先进成熟) 装备	108
文 18	熟料冷却技术的新突破——SF 型推动棒式篦冷机	113
文 19	新型双调节伸缩式喷煤管——Duoflex 型燃烧器	117
文 20	日产万吨级熟料煅烧技术与装备	121
文 21	水泥生产技术在韩国和泰国的新崛起	126
文 22	九条世界最先进的水泥生产线简介	135
文 23	日产熟料 10000 吨生产线在泰国投产	138
文 24	对“新型干法窑”和“现代立窑”称谓的商榷	143
文 25	对“现代立窑”和“新型干法窑”称谓的再商榷	145
文 26	立窑烧废料不能无视环境风险	147
文 27	为“立窑王”突围鼓掌,再鼓掌!	149
文 28	“洋眼”看中国	150

第四部分 国际国内水泥生产技术水平述评与展望

文 29	2000 年水泥工业生产技术水平展望	157
------	--------------------	-----

文 30	1997~2002 年我国水泥工业结构变化分析	165
文 31	水泥装备大型化的国际趋势及其对我国的启示	169
文 32	再论我国水泥工业发展形势及前景预期	174
文 33	国内外水泥工业技术发展热点简评	178
文 34	世界水泥 10 强浅析	182
文 35	跻身世界水泥 10 强不仅仅是产量	188
文 36	关于世界大型水泥（集团）公司的最新信息	190
文 37	试论我国水泥工业的新型工业化道路	193
文 38	树立科学发展观 改造优化水泥工业结构	198
文 39	国际水泥工业最新技术进展及预测	203
文 40	2004 年世界水泥工业概况	210
文 41	2005~2010 年我国水泥工业发展形势分析及预测	214
文 42	中国是未来世界水泥工业发动机	216
文 43	石灰岩储采比及使用年限应属两个概念	217
文 44	水泥工业有能力摘掉高污染高能耗的帽子	218
文 45	关于我国水泥工业高污染的反思	220
文 46	细化混合材标准 坚决废止患病水泥	224
文 47	水泥工业低温余热发电技术现状	225

第五部分 水泥工业可持续发展战略及实践

文 48	关于我国水泥工业发展历程和环保意识的反思	229
文 49	水泥工业与环境保护	235
文 50	论水泥工业可持续发展战略	247
文 51	现代水泥工业的节能与二次能源回收技术	254
文 52	ISO 14000 系列环境管理标准进军世界水泥市场	265
文 53	保护自然资本须提高公众素质落后的生产力必须淘汰	270
文 54	论我国水泥工业可持续发展的战略步骤	274
文 55	知识经济激励水泥工业可持续发展	278
文 56	试论新经济时代的水泥工业	283
文 57	环保型及互联网型：新经济时代的水泥工业	289
文 58	从我国水泥工业“由大变强，靠新出强”谈起	291
文 59	关于整合重组我国水泥混凝土大一统行业的建议	294
文 60	水泥混凝土生命周期环境评价	297
文 61	关于国际国内水泥工业利废潜力的研讨	303
文 62	再论水泥工业可持续发展的“四零一负”战略	308
文 63	循环经济与水泥工业的“四零一负”战略	316

第一部分

水泥生料均化链及其装备

文 1 论现代化水泥厂的生料均化系统

现代化水泥厂入窑生料成分的均匀性和稳定性对分解炉窑的优质高产与长期安全操作具有十分重要的作用。根据国外的实践经验，一般对入窑生料成分均匀性的要求如下。

石灰饱和系数： ± 1.5 ，例如 99 ± 1.5 ；

硅 酸 率： ± 0.05 ，例如 2.0 ± 0.05 ；

铝 氧 率： ± 0.05 ，例如 2.3 ± 0.05 ；

或碳酸钙含量的标准偏差 $S \leq \pm 0.2\%$ 。

显然，这样的指标与老式的干法水泥厂的相比，其要求是相当高的。另一方面，由于水泥工业的长期发展，质量稳定、成分均齐的水泥原料资源却在日趋减少，可用的原料资源的品位与其均匀性也在逐渐下降。因此必须在整个生料制备系统的每一道工序上同时考虑均化措施及其效果，使各种水泥原料在开采、运输、破碎、配料、粉磨、储存的过程中，每经过一道工序，其均匀性都有一定程度的提高，生料成分均匀性也逐步地达到了入窑要求的指标。由于这个原因，近十年来均化技术在水泥工业中获得了迅速的发展和广泛的应用，并且结合水泥生产的特点，逐渐形成了一个与生料制备系统并存的生料均化系统——生料均化链。本文就研究生料均化链的若干问题提出如下粗浅看法。

一、生料均化系统的组成

生料均化系统主要由四个环节所组成。在整个生料制备的过程中，每个环节都承担着一定的均化任务，从而组成了一条完整的均化链（如图 1-1 所示）。

1. 矿山的搭配开采与运输

搭配开采（国外称补偿性开采），它的内容与我国搭配开采的概念有所不同。它包括生产勘探；爆破或采掘设计；爆堆成分分布预测；爆堆装运设计；生产台段（掌子面）采运搭配；入厂原料成分的预测、检验、调节与控制等内容。复杂的矿山都有一名具有一定经验的采矿工程师全面负责生产和技术管理工作。

但是，国外的实践表明，矿山的补偿性开采在整个生料均化链中所负担的均化任务不宜太大，通常为总均化工作量的 10% 左右。如为了均化而使整个矿山开采过程过分复杂，增加开采成本，这是不经济的。因此掌握搭配开采的原则是：在经济开采和综合利用资源的前提下，尽可能地注意矿石的均匀性。对矿石的质量视均化链各个环节的情况而有两种不同类型的要求。

① 当工厂不设预均化堆场而采用吊车库或一般堆场时，对进厂矿石的要求往往是规定其品位不得低于某一指标，或其有害成分的含量不得超过某一指标。例如石灰石 $\text{CaO} > 48\%$ ， $\text{MgO} < 3\%$ 。

② 当工厂采用预均化堆场时，对进厂矿石的要求则为：在每一个料堆的储存期内（3~7d），进厂矿石的平均品位达到要求的范围即可。

石灰石和泥灰岩共生，或夹层较多，或覆盖较厚，或裂隙、喀斯特较发育的矿山，其进厂矿石碳酸钙含量的标准偏差 S_{Q_2} 可达 $\pm 10\%$ 以上。如果按上述第一种类型的指标要求，那么进厂石灰石的 S_{Q_2} 值一般为 $\pm 2\%$ 左右。这样矿山的剥离量就增大，许多低

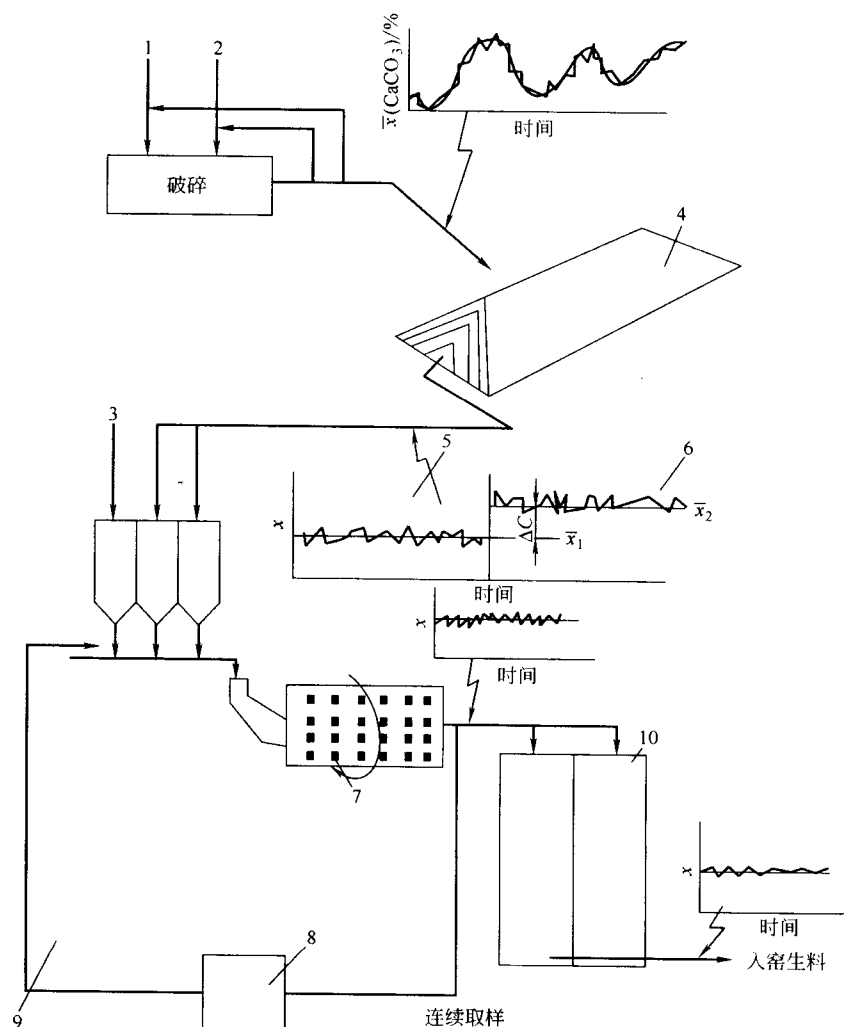


图 1-1 生料均化链示意

1—石灰石；2—页岩；3—辅助原料；4—预均化堆场；5—料堆 1；6—料堆 2；7—生料磨；
8—X 射线分析仪；9—生料配比控制与调节装置；10—生料均化库

品位的矿石和覆盖土等就被扔进了废石场，实际上是一种资源的浪费。

一般，在矿山开采与运输这个环节上，进厂矿石原料的成分波动具有长周期、低频率和高振幅的特性。搭配开采的任务就是适当缩短其波动的周期和降低其波动的振幅。

2. 原料的预均化与储存

预均化堆场在均化链中主要起两个作用。第一，消除进厂矿石原料的长周期波动；第二，显著地降低原料成分波动的振幅，缩小其标准偏差值。因此，预均化堆场出料的成分波动就具有短周期、高频率和低振幅的特性。

预均化堆场在均化链中担负的均化任务约占总均化工作量的 35%~40%。其出料碳酸钙的标准偏差 S_{B2} 可缩小到 $\pm 1\% \sim \pm 2\%$ ，其均化效果 S_{B1}/S_{B2} 可达 7~10。它可以为生料磨提供成分已知而又均齐的喂料。

预均化堆场因堆、取料方式和操作方式（长形与圆形）之不同，其出料成分波动特性也有所差异。一般规律大致如下：

当采用圆锥形堆料和侧面取料时，其均化效果较低，出料的标准偏差也较大；反之，采用人字形或波浪形堆料和端面取料时，其均化效果就较高，出料的标准偏差也较小。

长形预均化堆场取料更换料堆时，生料磨喂料成分就会有一个突变，即两个料堆的平均成分之间有一个 ΔC 的差别（见图 1-1）。这就必须及时调整生料磨头的原料配比以消除这一影响。此外，长形预均化堆场还有一个端锥效应，影响生料磨头配料控制的准确性。

但是在连续倾斜堆料操作的圆形预均化堆场中，上述两种影响就不复存在。在 $3 \times 120^\circ$ 操作的圆堆场中，其影响也不太显著。因此圆形预均化堆场的出料成分具有基本稳定而渐变的趋势，有利于磨头配料的精确控制（见图 1-2、图 1-3 和图 1-4）。

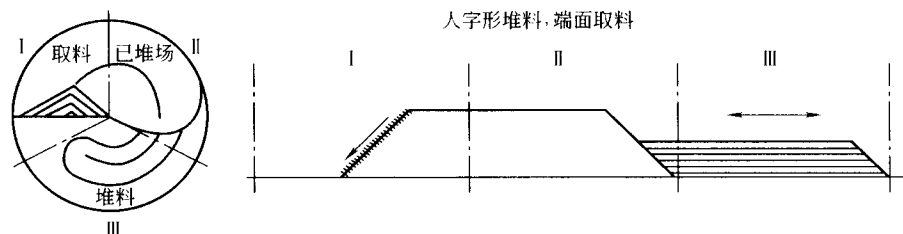


图 1-2 $3 \times 120^\circ$ 操作的圆形预均化堆场

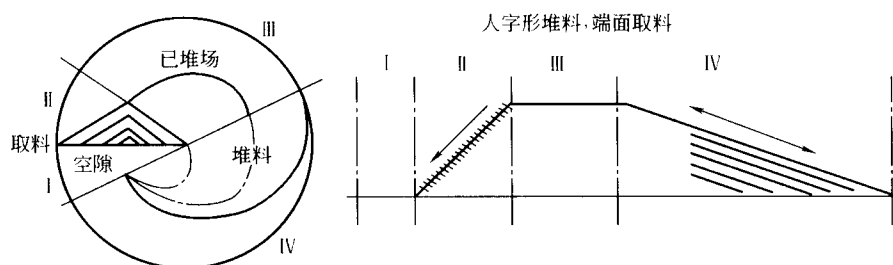


图 1-3 连续倾斜堆料操作的圆形预均化堆场

3. 生料磨的配料控制与调节

生料磨在均化链中的主要作用是控制与调节配料，使出磨生料成分尽可能地符合入窑的要求。为此，磨头均应装有较高精确度的重量喂料机，出磨生料用 X 射线荧光分析仪在线或离线检测，计算机自动调整各种原料的配比。

配料控制方法，目前国际上采用最多的是倾向性控制和累计补偿控制两种。

① 倾向性控制是分析出磨生料，检测其成分与配料机设定值之间的偏离，积累一定数量的分析数据后就可推算出配料机的实际配料成分值，从而达到及时修正配料机设定值的目的。但是由于控制点（磨头）和检测点（磨尾）之间有一定的延迟时间，所以往往要修正多次才能达到正确的成分控制。不过出磨生料的成分波动周期总比上述的延迟时间长得多，因此可以根据倾向性判断的控制方法达到调节和控制出磨生料成分的目的。这种配料控制法还可以将圆形预均化堆场出料成分的倾向性变化趋势一并考虑在内，其配料的准确性和精确度都很高，自控水平是最先进的。当然，它也要求工厂具有相应的技术水平、装备水平和管理水平。

② 累计补偿控制是检测出磨生料成分及其产量随时间的变化情况，然后计算出生料库中的平均成分值，进而调节配料机，使库内生料的平均成分尽可能地接近设定的目

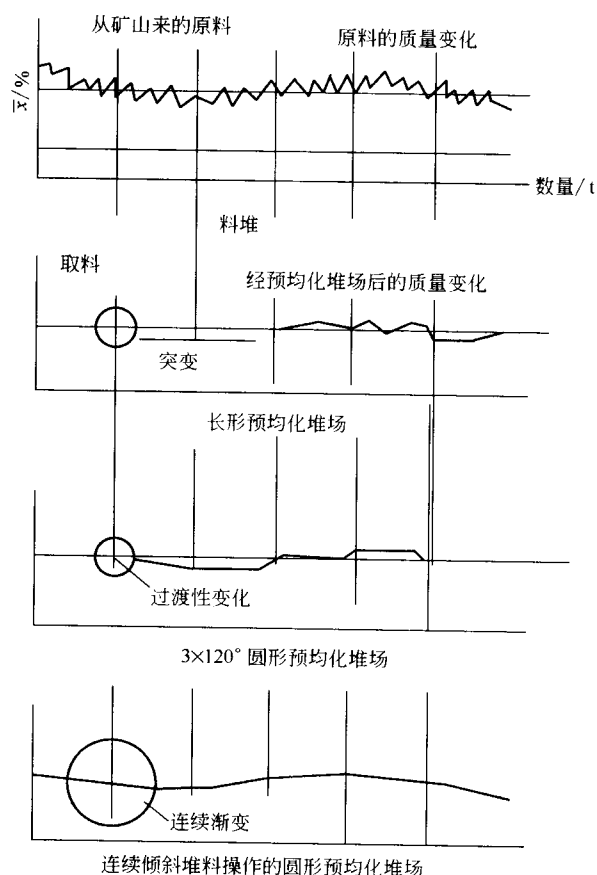


图 1-4 各种不同操作方式预均化堆场出料成分波动情况的比较

标值。如果工厂对自控水平的要求不是很高，这种方法在大多数场合下是可以满足现代化水泥厂的配料控制要求的。

生料磨在均化链中的作用是借助调整原料配比的方法，消除长形预均化堆场中料堆平均成分突变 ΔC 的影响；消除矿山掌子面上矿石品位长期（7d 以上）偏高或偏低的影响；尽可能地缩短出磨生料成分的波动周期；保持出磨生料碳酸钙含量的标准偏差 S_{M2} 稍小于或等于入磨石灰石的水平，即 $S_{M2} \leq S_{B2}$ 。因此，生料磨出料的成分波动也具有短周期、高频率和低振幅的特性。生料磨的首要任务是控制配料，就提高其碳酸钙含量的均匀性来看，它并没有多大的作用。但是从整个生料均化链来看，生料磨却大大地提高了生料中除碳酸钙以外的所有其他成分（ SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 R_2O 等）含量的均匀性。

如果仍以碳酸钙含量的标准偏差来衡量，生料磨在均化链中所完成的均化工作量约为总量的 0~15%。之所以会有如此大的变化幅度，完全取决于配料的控制水平、重量喂料机的精确度和磨机的型式。前两者的影响是显而易见的，假如配料控制不善，重量喂料不准，则经过生料磨以后，物料碳酸钙含量的均匀性反而可能下降，即 $S_{M2} > S_{B2}$ 。

至于磨机的型式，现今应用最广泛的是中卸提升循环磨和立式磨两种。由于物料在这两种粉磨系统中的通过时间不同，前者约为 10~12min，后者仅为 2~3min，即两者生料成分检测点和控制点之间的延迟时间相差较大，所以其他条件相同时，立式磨的配