

摘 要

节能是促进经济社会可持续发展、实现全面建设小康社会宏伟目标的关键之一。工业是能源和原材料的主要消耗大户，水泥工业又是大量耗能的工业，因此节能降耗成为我国水泥工业长期而重要的任务，实现这一目标的关键在于提高粉磨效率，降低粉磨作业电耗。

实际生产中，以辊压机为代表的料床预粉磨系统是料床粉磨的主导。预粉磨分为循环预粉磨、混合粉磨、联合粉磨和半终粉磨。

相对球磨机一级闭路粉磨工艺，联合粉磨和半终粉磨流程具有明显的系统优势。虽然半终粉磨在系统增产方面具有更好的效果，但其节能幅度却略低于联合粉磨，且设备选型时受到一定限制，因此在实际工程设计中，联合粉磨流程得到了更加广泛的应用。尤其在生产改造项目中，由于受到原有设备能力限制（尤其是原有选粉机的能力不足），选用半终粉磨流程局限性较大，而循环预粉磨、联合粉磨流程则具有较大的可行性，这其中又以联合粉磨流程更能取得良好的节能增产效果。

本文阐述了主要的水泥粉磨设备以及基于辊压机的预粉磨系统，针对辊压机粉磨系统首次了稳态模型：对于一个连续粉磨系统来说，系统处于动态平衡时的工作状态为的稳定状态，此状态下各变量是一个平稳的随机变量；即系统在物料流量及所有设备工作状况恒定条件下应达到的一个稳定工作点。本文中的稳态模型即是在这种状态下所建立的。利用该模型，在已知系统入料的流量和其粒度组成、粉碎和分级设备工作参数时，可以定量描述粉碎前后物料粒度组成的变化以及物料中各粒级经过分级后的走向分配情况，从而对系统作出必要的分析，本文主要是从能耗方面进行分析。针对内蒙古冀东水泥有限责任公司呼市水泥分厂的工程实践，本文利用模型对其进行了能耗分析，对该系统中分级设备的选择提出了依据，并针对粉碎参数 M 的优化提出了几点看法。

关键词：辊压机，联合粉磨系统，稳态模型，能耗分析

Abstract

Energy saving is a key of promoting continuable development of economic society and building a well-to-do society. Industry is the primary part of consuming energy and raw and processed materials, and cement industry consumes a lot of energy, so saving energy and lowering consumption is becoming an important and long-term task, the key of that is improving grinding efficiency and reducing electricity consumption.

In practice, roller press is the delegate of pressing pre-grinding which is the leading of pressing grinding. Pre-grinding is consisted of cycle pre-grinding, hybrid grinding, and combination grinding and semi-finished grinding.

Comparing with ball mill closed-circuit system, combination grinding system and semi-finished grinding system have obvious dominance. Although semi-finished grinding is better in production increase, its extent of saving energy is lower than combination grinding, and choosing equipment model is restricted at a certain extent, so in the design of practice, combination grinding is used more. Especially in changing produce item, because of the limit of ability intrinsic equipment (especially the weak ability of intrinsic classifier), choosing semi-finished grinding has big localization, but cycle pre-grinding and combination grinding have more feasibility, and combination can receive better effect in energy saving.

This paper expounds primary grinding equipment and roller pre-grinding system, builds a steady-state model for roller grinding system. In a continuous grinding system, the state in which system is under dynamic balance is an ideal state which is a certainly balanced and random process, in this process, the averages of every variable are not changed with time unless random disturb causes fluctuation. The steady-state model in this paper is built under the state. This model is used to gained material flux and granularity distributing in any stagy and analyzes the system in energy consumption. It analyses the energy consumption of Neimeng gu Cement Company with this model, puts forward rule of choosing classifier equipment in this system and the optimization of comminuting parameter M .

Key words: roller press, combination grinding system, steady-state model, analysis of energy consumption

第 1 章 绪论

1.1 课题来源

本课题来源于国家高技术研究发展计划(863 计划)引导项目“大型辊压机节能粉磨技术及装备的开发”的一部分,本文主要进行辊压机粉磨系统的能耗模型及其工程应用研究。

1.2 课题研究的目的和意义

节能是我国经济和社会发展的项长远战略方针,也是当前项极为紧迫的任务。推动全社会开展节能降耗、缓解能源瓶颈制约、建设节能型社会是促进经济社会可持续发展、实现全面建设小康社会宏伟目标的关键所在。

工业是能源和原材料的主要消耗大户,而水泥工业又在整个工业中占有举足轻重的地位。水泥工业是大量耗能的工业,全世界水泥业都不可避免地越来越感到成本压力,于是致力于大幅度地降低能源消耗成为项重要而长期的任务,其关键在于提高粉磨效率,降低粉磨作业电耗,降低粉磨电耗已成为粉磨技术进步的重要标志。

在水泥生产中,电耗成本占生产成本的 20%~30%。而其中用于粉磨原料和水泥的电耗约占总电耗的 65%,生料粉磨约占总电耗的 25%,水泥粉磨约占总电耗的 40%;而且球磨机能量利用率极低,仅有 3%~6%的能量用于增加物料比表面积,绝大部分输入能量转变为热能和噪声而浪费。因此,提高粉磨效率,降低粉磨电耗,成为人们关注的焦点。

为了寻求更为有效和实用的粉磨技术和设备,人们一直在不断地探索、实践、更新,料床粉磨是最受关注、最有成效的粉磨新技术。当前典型的料床粉磨设备有立式磨、辊压机和筒辊磨,它们的特征是分别依靠相对运动的辊—盘、辊—辊、辊—筒碾磨装置来粉磨物料。

三种料床粉磨设备各有优缺点,工作原理略有区别,但没有本质的不同。它们一方面在相互竞争中逐步改进,另一方面作为整体在和球磨的抗

衡中得到发展, 由于其显著的节能效果, 至今已动摇了球磨的主导地位。从粉磨系统来说, 以上 3 种料床粉磨设备均可组成不同的预粉磨和终粉磨流程。其中料床粉磨设备在系统中起的粉磨作用越大, 其节能效果也越大。

常见的挤压预粉磨系统一般可为四种基本型式: 循环预粉磨型式; 联合粉磨型式; 混合粉磨型式; 半终粉磨型式。本课题的主要对目前应用较为广泛且与课题来源紧密联系的基于辊压机的联合粉磨系统进行能量耗散分析, 作出它的数学模型, 反映出系统中部分参数对能量耗散的影响, 并对关键参数进行分析, 即描述和优化具体的粉磨过程。参数的正确应用对水泥粉磨的作用很大, 不仅可降低能耗, 提高设备工作能力, 延长设备的使用寿命, 创造较好的经济效益; 而且通过系统参数的变化可以判定系统存在的问题, 从而减少维修时间、维修频率, 避免了一些不必要的损失。

这些都对于指导粉磨生产实践有重要意义。

1.3 国内外研究现状分析

水泥粉磨系统提产降耗历来是人们关注的焦点, 尤其是 ISO 标准实施后, 对于国内大多数水泥生产厂家来说, 尽快使自己的产品适应新标准要求, 又不影响水泥产量、增加生产成本, 对水泥粉磨系统进行优化改造无疑是一条必经之路。我国是水泥生产大国, 但整体装备水平较为落后, 水泥粉磨系统与国际先进水平差距更大。从这一角度来讲, 国家实施 ISO 标准, 将在一定程度上促进我国水泥行业粉磨技术的进步。

德国科劳斯特尔大学的 K. 逊拉特教授于 1977 年获得了辊压机技术的专利, 1984 年德国制造出第一台辊压机。我国引进德国洪堡公司技术, 并且加强了自己的开发工作, 在 1992 年制造出第一台国产辊压机, 通过不断改进和创新, 国产辊压机技术已经成熟, 合肥水泥研究设计院、天津水泥工业设计研究院现在可以提供大型水泥粉磨的辊压机。辊压机的出现使粉磨技术有了重大进步, 尤其是随着世界能源形势的日益紧张, 在水泥厂采用辊压机粉磨技术将变得更为重要。

众所周知, 自辊压机出现以后, 在水泥工业很快得到了推广, 表现了很强的生命力。与传统的球磨机相比, 辊压机的粉磨效率高、能耗低,

当与球磨机组成联合粉磨系统后，可以大幅度增加产量。

在欧洲，主要在德国，使用辊压机作为水泥预粉磨设备早已出现，之后，辊压机作为水泥联合粉磨和终粉磨设备也得到了应用。

围绕粉磨过程的优化问题，多年来人们做了大量的工作，这包括粉磨机理解析、设备结构和材质改进、工艺参数最佳化及过程优化控制等。这些研究与描述粉磨过程和参数关系的数学模型密切相关，同其他工业过程一样，数学模型研究是过程优化研究的基础。

数学工具的发展为不同目的的新型数学模型发展奠定了基础，如模糊数学和时间序列分析的应用使球磨过程模型从稳态过渡到了有时间变量的动态模型，使模型更适用于磨机的自动控制。突变学和耗散结构理论的应用对粉碎过程从微观和宏观上给予了全新的解释，反映了物料粉碎过程的不可逆性、不连续性和突变性等特点；从物料系统状态的稳定性研究出发，将粉碎机理的研究推进到非线性热力学和动力学的范畴。采用分维方法将反映粉磨产物颗粒表面不规则性和表面能的大小与宏观上外部对粉碎系统输入能量的多少联系了起来，圆满地解释了 Bond 的粉碎能耗模型和理论为什么取指数 0.5 较为符合球磨过程实际的原因。

但是，由于粉磨系统的复杂性和不同时期科学研究手段的局限，针对整个系统的数学模型的研究至今没有得到令人满意的结果。

1.4 本文的主要研究内容

(1) 建立辊压机粉磨系统处于动态平衡时的稳态模型，定量描述粉碎前后物料粒度组成的变化以及物料中各粒级经过分级后的走向分配情况，从宏观上把握整个粉磨系统；

(2) 结合生产实际，从辊压机联合粉磨系统中分级设备前置或后置两个不同的工艺流程来分析模型；

(3) 通过具体的工程实践，利用本文建立的模型进行能耗分析与研究，得出自己的结论；

(4) 从实际生产出发，通过能耗计算与比较，得出在不同的系统产量范围内，V 型选粉机和打散分级机的选择应有所不同。

1.5 本文结构

全文的章节安排如下：

第一章 绪论

主要介绍了课题来源及研究的目的和意义，并分析了国内外研究现状及本文的主要研究内容。

第二章 典型水泥粉磨设备的介绍

主要介绍了传统的水泥粉磨设备——球磨机以及典型的料床粉磨设备——辊压机、立式磨和筒辊磨的工作原理和优缺点。

第三章 基于辊压机的水泥粉磨系统

主要介绍了基于辊压机的预粉磨系统，包括循环预粉磨系统、混合粉磨系统、联合粉磨系统和半终粉磨系统的流程和特点，以及配套的主要分级设备：打散分级机和 V 型选粉机。

第四章 辊压机粉磨系统的稳态模型

主要介绍了粉磨系统的数学模型发展史，并建立了分级设备前置和后置两种辊压机联合粉磨系统的稳态模型。

第五章 以内蒙古冀东水泥有限责任公司呼市水泥分厂的工程实践为例利用模型进行能耗分析

将模型应用于工程实践，对该系统进行能耗分析，并提出该系统分级设备选择的依据。

第六章 结论与有关问题的讨论

第2章 典型水泥粉磨设备的介绍

2.1 传统水泥粉磨设备——球磨机

长期以来，球磨机在水泥粉磨系统中一直占有主导地位，100多年来技术也在不断进步，它的历史几乎与水泥工业的历史一样悠久。球磨机的出现，使冶金、电力、选矿、化工等工业实现了飞速发展，由于其对各种物料的适应性强、粉磨能力高、制造简单、可满足各种生产能力的要求，长期以来受到人们的青睐。仅水泥工业的粉磨作业，包括生料粉磨和水泥粉磨基本上都是应用球磨机来作为粉磨手段；这种磨机由于筒体较长，可使物料在磨内被粉磨的时间较长，得到成品的细度也较高。

球磨机的主要工作部分就是装在两个大型轴承上并水平放置的回转圆筒，筒体用隔仓板分成几个仓室，在各仓内装有一定形状和大小的研磨体。研磨体一般为钢球、钢锻、钢棒、卵石、砾石和瓷球等。为了防止筒体被磨损，在筒体内壁装有衬板。

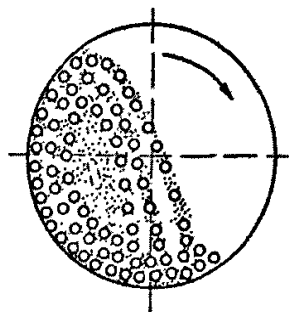


图 2-1 球磨机粉磨物料的作用

当球磨机回转时，研磨体在离心力和与筒体内壁的衬板面产生的摩擦力的作用下，贴附在筒体内壁的衬板面上，随筒体一起回转，并被带到一定高度（如图 2-1 所示），在重力作用下自由下落，下落时研磨体像抛射体一样，冲击底部的物料把物料击碎。研磨体上升、下落的循环运动是周而复始的。此外，在磨机回转的过程中，研磨体还产生滑动和滚动，因而

研磨体、衬板与物料之间发生研磨作用,使物料磨细。由于进料端不断喂入新物料,使进料与出料端物料之间存在着料面差能强制物料流动,并且研磨体下落时冲击物料产生轴向推力也迫使物料流动,另外磨内气流运动也帮助物料流动。因此,磨机筒体虽然是水平放置,但物料却可以由进料端缓慢地流向出料端,完成粉磨作业。

使用球磨机对物料进行粉磨,具有以下优点:

I 对物料物理性质波动的适应性较强,能连续生产,且生产能力较大。便于大型化,可满足现代化企业大规模生产的需要;

II 粉碎比大,达 300 甚至可达 1000 以上,产品细度、颗粒级配易于调节,颗粒形貌近似球形,有利于水泥的水化;

III 可烘干和粉磨同时进行。粉磨的同时对物料有混合、搅拌、均化作用;

IV 结构简单,运转率高,可负压操作,密封性良好,维护管理简单,操作可靠。

但是,它的缺点也是很明显的:

I 转速低(一般为 15~30r/min),因而需配减速器;

II 设备笨重,总重可达几百吨,一次性投资大。噪音大,并有较强振动;

III 研磨体和衬板的消耗量大;

IV 电耗高,约占全厂总电耗的三分之二。生产 1t 水泥的综合电耗约为 90~110kW.h。粉磨效率低,电能有效利用率低,只有 2%~3%。

据 Anselm 的粉碎功能理论测定^[6]:轴承、齿轮等纯机械损失占 12.3%,随产品散热占 47.6%,从磨机筒体散发的辐射热占 6.4%,空气带走热量占 31.4%,用于粉磨物料的能量仅占约 2%~3%。可见其大部分能量消耗对物料的粉磨来说是毫无用处的。而破碎时,用于物料破碎的能量可达 20%~30%,因此“多破少磨”、“以破代磨”可提高产品能耗的利用效率。“多破”就是尽量把磨机第一仓的破碎搬到磨外,在磨外增加预破碎装置,降低入磨物料粒度。随着粉磨工艺的不断改善和发展,这一理念已逐步为人们所接受。以其他能量利用率较高(30%以上)的粉磨设备来代替球磨机一仓的细碎、粗磨工作,让球磨机充分施展以研磨为主的细磨作用,对于粉磨工艺的节能高产具有十分重要的意义。

2.2 典型的料床粉磨设备

20 世纪 80 年代以来,料层挤压粉碎技术及装备取得了突破发展,是基于在较大的压力作用下颗粒间相互作用而粉碎的理论发展起来的。以挤压方式实现粉磨的料床粉磨设备,其能量有效利用率较高、能耗低、机构紧凑、占地面积小。料层挤压粉碎技术及装备广泛应用于水泥、火电、矿山开采加工等许多行业,它的发展一直受到各行业密切关注。德国 Claustal 学院 *Schönert* 教授明确定义“料床粉碎”这一概念为^[14]:“物料不是在破碎机工作面上或其他粉磨介质间作单个颗粒的破碎或粉磨,而是作为一层或一个料床得到粉碎。料床在高压下形成,压力导致颗粒压迫其他邻近颗粒,直至其主要部分破碎、断裂,产生裂缝或劈开。”

水泥工业中典型的料床粉磨设备有辊压机、立式磨和筒辊磨,它们分别是辊—辊、辊—盘、辊—筒结合的碾磨装置。三种料床粉磨设备各有优缺点,工作原理略有区别,但没有本质的不同。它们一方面在相互竞争中得到改进,另一方面作为整体在和球磨机抗衡中得到发展,由于其显著的节能效果,至今已动摇了球磨机的主导地位。

2.2.1 辊压机

辊压机是根据料床粉磨原理设计而成的,如图 2-2 所示。它主要由两个速度相同、相向转动的辊子组成,其中一个固定辊,一个是活动辊;物料由辊压机上部连续地喂入并通过双辊间的间隙,在 50~3000MPa 的高压力作用下,受压物料变成密实且充满裂缝的扁平料片,或称料饼。这些料饼机械强度很低,手捻即碎,含有大量的细粉,而且还有许多的微裂纹,易磨性改善明显,使后续球磨机系统的粉磨状况大为改观,从而大幅度降低了整个粉磨系统的单位电耗。

辊压机与球磨机相比有如下优点:

(1) 粉磨效率高,增产节能。在球磨机中物料受到的是压力和剪力,是这两种力的综合效应;在辊压机中,物料基本上只受压力。实验表明,在颗粒物料的破碎过程中,如只施加纯粹的压力所产生的应变相当于剪力所产生的应变的 5 倍;

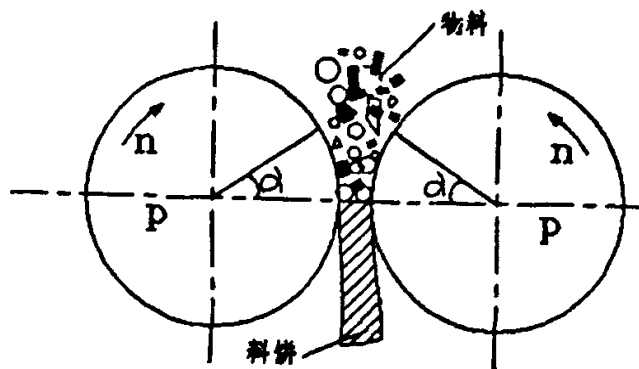


图 2-2 辊压机工作原理示意图

（2）降低钢铁消耗。粉磨水泥时，球磨机单产磨耗为 300~1000g/t，采用辊压机的粉磨系统，单产磨耗为 0.5g/t，所以它可以满足粉磨白水泥的要求；

（3）噪音低。规格为 $\Phi 4.2 \times 13\text{m}$ 的球磨机噪音约在 110dB 以上，而同产量的 $\Phi 1.6 \times 1.4\text{m}$ 辊压机约为 80dB；

（4）体形小，质量轻，占地面积小，安装容易，甚至可以整体安装。相比球磨机的不足之处：

（1）会产生边缘效应：主要有辊压机磨辊两端漏料和向两边逸出物料；

（2）存在选择性粉碎：由于不同物料间物理性能的差异，即使在料饼中仍然存在未得到充分粉碎的物料颗粒；

（3）由于辊压机辊子作用力大，因此辊压机存在辊面材料脱落及磨损，轴承容易损坏，减速器齿轮过早溃裂等设备问题；此外，对工艺操作过程要求严格，例如要求喂料料柱密实、充满，并保持一定的喂料压力，回料量控制要恰当，粉磨工艺系统配置要合适，否则它的优越性就不能发挥。

2.2.2 立式磨

立式磨是根据料床粉磨原理来粉磨物料的机械，磨内装有分级机构而构成闭路循环，加压机构提供粉磨力；同时也借助磨辊与磨盘运动速度差异产生的剪切研磨力来粉碎、研磨料床上的物料。立式磨中的粉磨过程是物料被拽入并被磨辊和磨盘夹住，由于压力集中在较大的颗粒上，它们最先受到挤压作用并被破碎；随后由磨辊施加的压力被传递到较小的颗粒上，进行较小颗粒的粉碎，这一过程连续进行直到磨辊与磨盘间的最窄处，并伴随有表面积的增加。与此同时，承受重载荷的单一颗粒将进行空间位置重排，产生的挤压和剪切作用将进一步提高粉磨效果，增加细粉颗粒含量，磨辊与磨盘之间的相对运动也有助于这一作用。

立式磨与传统的球磨机相比有如下主要优点：

- (1) 粉磨效率高、能耗较低；
- (2) 烘干能力大，烘干效率高；
- (3) 入磨物料的粒度可以放宽，能够粉磨较粗的物料；
- (4) 占地面积小，质量轻；
- (5) 噪音小，扬尘少，有利于环境保护；
- (7) 易损件寿命长。

缺点如下：

- (1) 不适宜粉磨磨蚀性大的物料；否则，不仅辊套和磨盘衬板磨耗大，而且产量、质量均下降；
- (2) 辊套和磨盘的耐磨性偏低时，辊套易磨损，且易松动，维修工作量大，运转率下降；
- (3) 操作人员需有较高的技术水平。

2.2.3 筒辊磨

筒辊磨巧妙地结合了现有球磨机和辊压机的基本思路，利用不太高的挤压力，使物料由一次喂入设备内而实现多次挤压粉磨，从而避免了困扰着现有立磨、辊压机工艺的各种问题，包括过大的研磨件磨耗、过高的轴承负荷、过多的外循环物料量，以及水泥产品的质量等。它的优势主要在于为挤压粉磨工艺找到了一条较立磨和辊压机更充分地发挥其节能潜力的途径。

筒辊磨的粉磨过程如图 2-3 所示。物料由喂料设备通过进料端盖上的进料口，经喂料板进入筒体内的喂料区，由于离心力的作用，进入筒体内的物料迅速贴壁；当物料随筒体转到特定位置时，被设置在筒体内的刮料板刮下，经导料板（导料板在筒体轴向成一定的螺旋角，角度可调）的作用将物料布到筒体的粉磨区，在辊子与筒体内壁形成的咬入区内物料被咬入；由于摩擦力的作用，加压的辊子被咬入的物料带动旋转，进入咬入区的物料最终通过辊子与筒体内壁形成的最小间隙处（压力最大处），此时物料完成一次挤压作用。经挤压的物料仍然紧贴筒体内壁，当物料随筒体再次转到特定位置时，又被刮料板刮下，由于导料板的螺旋作用，物料沿筒体轴线前进一个螺旋导程，进入辊子轴向的另一粉磨区。物料重复上述挤压过程，物料在筒体内始终按设定的螺旋线前进，当物料离开粉磨区时，已受压多次，其受压的次数取决于导料板的导料角度。离开粉磨区的物料进入卸料区经出料罩排出磨外，由此实现一次通过、多次挤压。

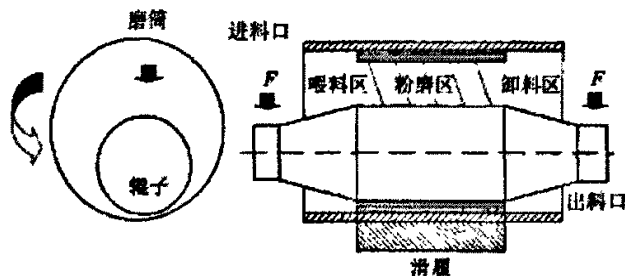


图 2-3 筒辊磨的粉磨过程

通过对筒辊磨的粉碎原理和其粉碎机理的分析以及与球磨机磨制的水泥性能对比可知，筒辊磨的技术特性可归纳为以下几点：

（1）采用中等粉磨压力，大大提高设备可靠性和使用寿命，提高设备运转率；

（2）具有一次通过、多次挤压功能，采用不同的循环负荷和不同的挤压次数可获得不同的产品粒度分布和操作指标，使操作具有很大的灵活性；

（3）以超临界转速运转，实现了物料流动在一定程度上的可控性；

(4) 立磨和辊压机的钳入角一般分别为 6° 和 12° ，筒辊磨的压力角可达 18° ，钳入角大，使物料在筒辊磨内受压时间延长，运行更平稳；

(5) 采用平衡杆加压机构，对稳定料床、降低振动强度、平稳辊轴受力和延长轴承寿命有良好作用；

(6) 筒辊磨水泥颗粒级配比球磨机更合理，水泥强度发挥好，相同熟料质量，用辊筒磨生产水泥可多掺混合材，降低水泥生产成本，提高经济效益；

(7) 筒辊磨工艺流程简单，主机设备少，占地面积小；单位产品电耗低，相同产量时，球磨机综合电耗一般在 $35\sim 45\text{kW/t}$ ，而筒辊磨综合电耗只有 26kW/t ，节电可达 $35\%\sim 70\%$ 。

不足之处可归纳如下：

(1) 运行维护费用较高；

(2) 当矿渣参入量较高时，辊面耐磨层的寿命不甚理想；

(3) 更换辊套及筒体衬板的过程比较麻烦。

第3章 基于辊压机的水泥粉磨系统

三种料床挤压粉磨设备均可和球磨机组成各种形式的系统,从目前我国使用情况介绍来看,无论利用辊压机、立式磨、筒辊磨还是短球磨作为预粉磨设备,均可获得增产节能的效果,增产幅度达30%~50%。预粉磨是指在球磨机前增设一台料床粉磨设备,使原有球磨系统大幅度增产的措施。随着预粉磨技术的进展及相关设备制造水平的不断提高,熟料预粉磨技术在水泥生产中得到了越来越广泛的应用。

从能量利用率方面来讲,输入能量的利用率随被粉碎料床的受限程度提高而提高。球磨机中料床四周不受限,立式磨和筒辊磨部分受限,辊压机则基本全部受限。所以四种预粉磨设备能量的利用率由低到高依次为短球磨、立式磨、筒辊磨、辊压机。

实际生产中,以辊压机为代表的料床预粉磨系统是料床挤压粉磨的主导。这是由于一方面辊压机大幅度节能同时更好的保持水泥的原有特性,另一方面一个大型机组一分为二,每个设备的功率较小,机械机构更好解决。

大量生产实践表明,通过辊压机对颗粒较粗的熟料和易磨性较差的矿渣先行破碎,磨机台时产量能够很容易地提高30%~40%左右,确实是一条大幅度提高主机台时产量、降低产品单耗的有效途径,但这其中必须包含一个“工艺合理”的前提,系统中一旦存在设计缺陷,它对生产的影响往往是致命的。

辊压机预粉磨系统是区别于终粉磨系统以外的总称,实际上可分为预粉磨系统(或称循环预粉磨系统)、联合粉磨系统、混合粉磨系统、半终粉磨系统等(如图3-1所示)。其中最典型的是循环预粉磨系统和联合粉磨系统,其他系统均由此演变而来。这些系统都充分利用了料床挤压粉碎这一原理,同时由于这些粉磨系统在利用辊压机设备本身节能优势的程度上不尽相同(分别采用边料循环、粗粉循环和粗料循环等物料循环方式),所取得的节能效果也各不相同,但总的来说都使得整个粉磨系统的单位电耗明显下降,生产能力大幅度提高。

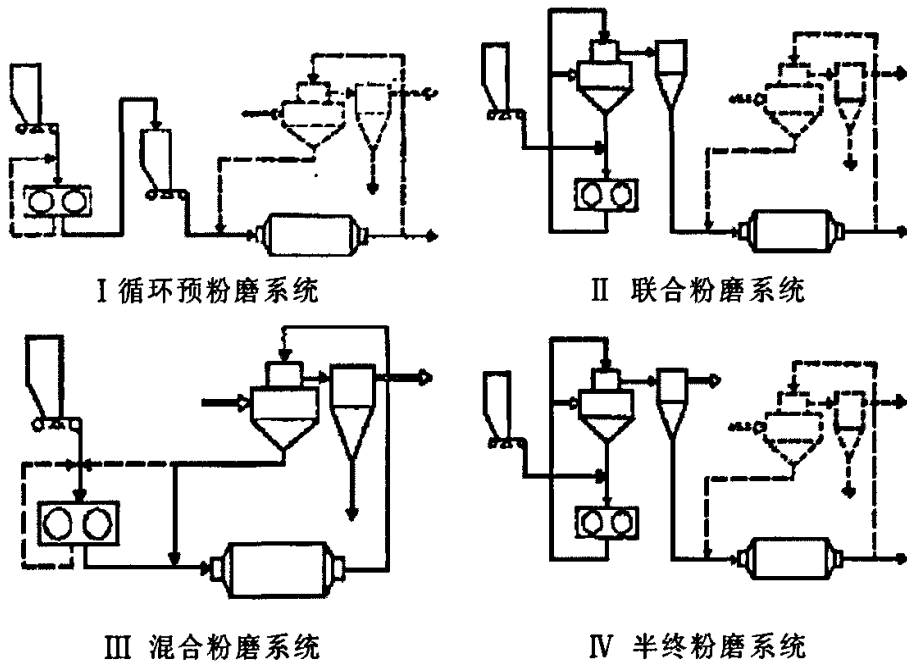


图 3-1 辊压机预粉磨系统

3.1 预粉磨系统

3.1.1 循环预粉磨系统

循环预粉磨系统中辊压机单独操作，要粉磨的物料先经辊压机粉碎，然后进入球磨机。为提高粉磨效率，产出的料片至少要部分返回辊压机再次粉磨，一般循环系数不超过 2，例外时，循环系数可达到 3.5。经过辊压机挤压后的物料分为两部分：挤压效果较好的中间料饼部分入球磨，挤压效果较差的边料部分回辊压机再挤压，其流程如图 3-2 所示。该系统与单独球磨机系统相比，具有一定的增产节能效果。

针对目前国内辊压机运行不够稳定的状况，这种流程有一定缓冲作用，不至于因辊压机的开停而影响后续球磨的正常生产。如条件允许，还可在用电高峰时单开辊压机，待用电低谷时单开后续球磨，以此可以进一步降低生产成本。

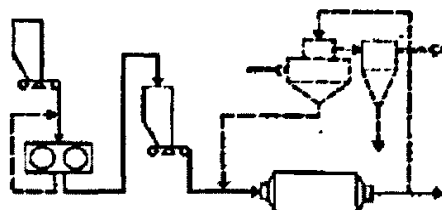


图 3-2 循环预粉磨系统

循环预粉磨在国内外早期的应用较多。因为循环预粉磨流程简单，料饼直接入磨，一般用于技术改造时，原有系统可基本不变，因此常用于老厂改造，最适合球磨机现有粉磨能力要增加的情况。但又由于辊压机负担的粉磨任务小，单位吸收功率约 $4\sim 7\text{kWh/t}$ ，故增产节能幅度较小，一般增产 $<60\%$ ，节电 $<15\%$ 。根据生产经验，认为预粉磨仅经过一次挤压的出机粒度分布较宽，使进入球磨机的物料粒度很不均匀，其中往往含有未被压碎的原始颗粒，使后续球磨的配球难于适应，导致过粉磨或欠粉磨的现象相当突出，影响磨机操作，系统运行及其产量的周期性波动加重。因此，早期的预粉磨多由一次挤压改为闭路循环多次挤压或直接采用挤压联合粉磨更显得经济和实用。

3.1.2 联合粉磨系统

联合粉磨系统因为辊压机循环挤压次数多（3次以上），允许辊压机消耗更多的能量，使系统节能幅度最大化，已逐步成为辊压机系统的首选方案，可用于老厂技术改造和新厂建设。

联合粉磨系统比较充分地利用了辊压机的节能优势（即辊压后的物料粒度减小），由打散分选设备与辊压机组成的粗料循环闭路系统。物料首先经辊压机挤压成料饼，出料经分选后分为两部分：粗料部分回辊压机再挤压，细粉部分进入后续球磨（流程如图 3-3 所示），这种工艺最大程度的体现了系统各设备的分工明确和优势互补。例如：辊压机的料床粉磨原理使物料挤压的粒度控制到最佳化，生产出 $200\text{m}^2/\text{kg}$ 比面积左右的半成品，粒度均匀，为后续磨机的粉磨提供了适宜的粒度分布，非常适合作为磨机的喂料，后续球磨配球球径可小，可用单仓磨；打散分选设备既控制细粉达到入磨粒度的均匀，其粗颗粒则返回挤压促进了辊压机运行的稳定

性；球磨机则依赖于前者的有效控制，得以大幅度提高产量、降低电耗，从而提高整个粉磨系统的粉磨效率。各部分相得益彰，构成一个完整的高效粉磨系统。

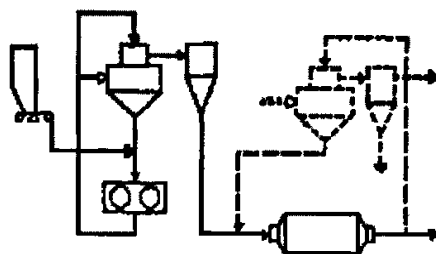


图 3-3 典型的联合粉磨流程

该系统中辊压机单位吸收功率大，一般为 $8\sim 12\text{kWh/t}$ ，故增产幅度大，达 100% 以上，可成倍增加；并且由于辊压机担负的工作量大，同时也避免了较细颗粒混杂在循环料中，导致辊压机和磨机做无用功而造成的能源浪费，故节能效果较好，达 15%~25%。

联合粉磨系统相对复杂，辊压机与球磨机同步运行，因此对辊压机的运转率要求高。由于出辊压机的物料成饼状，所以与其相配套的选粉机需具备打散功能，否则将需单设打散机，使系统更为复杂。

合肥水泥研究设计院研制开发的 HFCG 辊压机+SF 打散分级机+高细高产磨的联合粉磨工艺，其主要不同点是球磨机以开流为主。国内许多厂由于受球磨机结构性能的限制，磨机系统多为闭路，其增产节能主要通过减小入磨粒度以减轻磨机的压力来实现，成品仍依靠选粉机获得。因此，工艺的复杂性并未使系统投资和操作控制的简化等方面得到根本改善。相对而言，带高细高产磨的挤压联合粉磨工艺，则既从改善入磨粒度，也从优化设备运行参数尤其是球磨机的结构性能等方面共同体现出增产节能的高效率。目前的大面积应用已普遍达到产量翻番，节电 25%~30% 的生产水平。

从应用情况来看，挤压联合粉磨新工艺在水泥厂粉磨系统改造中有其不可替代的优势。首先可以大幅度提高系统产量，并且可以保持原有的系统，保持一套配料系统不变，仅适当提高配料和输送能力即可；其次，改

造后可以提高长径比小的球磨机的水泥产品比表面积，以适应国家水泥新标准的实施。

与循环预粉磨相比，联合粉磨有优点也有缺点。循环预粉磨和联合粉磨的相关技术特征比较如表 3-1。

表 3-1 循环预粉磨与联合粉磨的对比

粉磨系统	预粉磨	联合粉磨
工艺流程	简单	复杂
设备配置	辊压机小、球磨大	辊压机大、球磨小
辊压机吸收功率 (kWh/t)	4~7	8~12
辊压机和系统能力比	<200	350~500
增产幅度 (%)	<60	70~170
节电幅度 (%)	<15	15~25

两种不同的系统，其辊压机和球磨机必须要合理匹配。预粉磨的特点是辊压机小、球磨大；而联合粉磨是辊压机大、球磨小。预粉磨中辊压机的通过能力应小于系统能力的 2 倍，否则将因为料饼中已含有过多的成品回辊压机形成重压而浪费能量；此外过多的细粉喂入辊压机将造成脱气困难而影响正常操作，因此辊压机过大非但无用还必须设中间仓储存以适应磨机能力；同样对联合粉磨如辊压机能力偏小将使中间半成品过粗，分选困难，并可能带有较粗颗粒，减弱后续球磨均匀喂料的优势；此外从节电来说，联合粉磨较预粉磨在粗选粉机和辊压物料提升方面要多耗能 1.5~2.0kWh/t，所以至少辊压机要多吸收单位功耗 2kWh/t 以上才能抵消，因此要真正显示出联合粉磨节能的优越性，其辊压机吸收功率应大于 10kWh/t。辊压机本身的设计也应考虑其使用系统的不同而有不同的参数。根据试验资料表明，辊压高宜采用低料饼循环，循环负荷 100%，循环率为 2 时最有效，而辊压低宜采用高料饼循环，循环负荷 300%，循环率为 4 时较好。料饼经分选后的粗粉再循环远较单纯的料饼循环为好，因此当前循环预粉磨用的辊压机，其投影压力为 7500~8000kN/m²，而联合粉磨则降至 5000~5500kN/m²；投影压力的降低也有利于减少辊面的磨损。由于辊压的不同，相应的其它参数如能力、动力、单耗等等也不尽相同。当然亦可

用设计压力较低、仅能满足联合粉磨要求的辊压机来组成预粉磨系统，那么其吸收功率和增产幅度将减少。总的来说辊压机的有关参数必须和粉磨系统相配合，这在设计之初就应考虑。

综上所述，挤压联合粉磨新工艺技术为水泥厂粉磨系统的改造提供了节能高效、运行可靠的新型粉磨技术及装备。无论在节能增产效果还是在设备选型规格上，联合粉磨流程都具有更完善的综合优势，只要我们深入了解并掌握辊压机的工作原理和性能特征，就能使水泥粉磨进一步节能降耗，并创造出更大的经济效益和社会效益，值得在以后的工程设计和生产改造中大力推广和应用。

3.1.3 混合粉磨系统

在混合粉磨系统中，物料先经辊压机粉碎，然后进入球磨机；磨后球磨机的选粉机把一部分粗粉循环反馈到辊压机中进行再循环，增强了预粉磨的作用，细粉为成品，如图 3-4 所示。适当粗粉回辊压机可使机内料床更密实，使辊压机承担了更多的任务，节能效果更好，约增产 40%，节电 30%；但流程较复杂，且粗粉循环负荷过大时，将造成辊压机排气困难，操作不稳，一般循环负荷<130%。

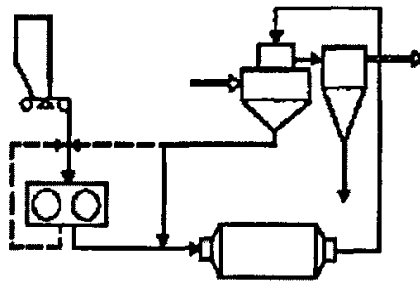


图 3-4 混合粉磨流程

在多种粉磨流程中，由于混合粉磨系统控制回路较长、调整缓慢，且辊压机在系统中所担负的粉磨任务与预粉磨系统相比没有多大差别，增产节能效果不明显，而工艺流程却比预粉磨系统复杂，在实际生产中虽然采用此流程的不少，但真正按混合粉磨工艺运行的却很少，一般多用于水泥

生料生产。

3.1.4 半终粉磨系统

半终粉磨系统中，系统中高压辊压机与选粉机形成回路运行。产出的料片在进入选粉机前先经打散机打散，和出磨物料混合后进选粉机分选，选粉机出来的细粉作为系统的成品，粗粉回磨机和辊压机，如图 3-5 所示。在此流程中，预粉磨机可以充分发挥作用，并可使球磨机一仓的平均球径减小。即该工艺是将打散分级机的半成品与后续球磨机的出磨物料一同送入选粉机分选，也就是说一部分产品未经过球磨机而直接由辊压机和选粉机直接产生。该流程最常用于新安设的水泥熟料粉磨系统以及生料粉磨，用于水泥磨时不经济。主要原因是料饼中 $<80\mu\text{m}$ 的含量已占 30%以上，而 $<30\mu\text{m}$ 的含量少。因回辊压机的是粗粉，同样存在循环负荷较小，使节能效果受限。

相对于联合粉磨流程，同样采用粗料循环方式的半终粉磨也充分地利用了辊压机的节能优势（即辊压后的物料中已含有不少成品），将辊压后已产生的成品细粉先行选出，避免细粉混杂在循环料中，导致磨内过粉磨现象，从而有效地提高系统产量。但这种粉磨流程对后续高效选粉机要求较高，设备规格较大，导致收尘器、废气风机等设备规格同步加大，否则系统能力就会降低。这对系统设备投资和系统电耗都带来较大压力，也在一定程度上限制了该流程的大量应用。

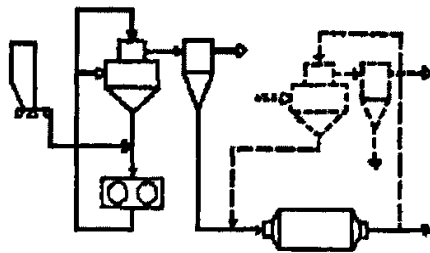


图 3-5 部分终粉磨系统流程图

相对球磨机一级闭路粉磨工艺，联合粉磨和半终粉磨流程具有明显的

系统优势。虽然半终粉磨在系统增产方面具有更好的效果，但其节能幅度却略低于联合粉磨，且设备选型时受到一定限制，因此在实际工程设计中，联合粉磨流程得到了更加广泛的应用。尤其在生产改造项目中，由于受到原有设备能力限制（尤其是原有选粉机的能力不足），选用半终粉磨流程局限性较大，而循环预粉磨、联合粉磨流程则具有较大的可行性，这其中又以联合粉磨流程更能取得良好的节能增产效果。

3.2 分级设备的选择

随着辊压机的推广应用，虽然挤压过的物料中有 70% 小于 2mm 颗粒，并且有约占总量 25%~30% 小于 0.08mm 的成品，但是仍有约占总量 10%~15% 大于 5mm 的大颗粒；并且随着辊压机使用周期的加长，侧挡板磨损后而未能及时更换，大颗粒的比例将加大。因此，挤压过的物料颗粒分布很宽，使得后续球磨机的配球较难适应上述物料，影响系统产量的进一步提高。如何为了进一步完善挤压粉磨系统，使得进入后续粉磨系统的物料颗粒小而均齐，成为各国挤压粉磨技术研究的主要内容，国外各大水泥装备公司相继开发出多种设备和新工艺来达到上述目的。

高效节能的分级设备是保证系统优质高产的一个重要环节，分级设备只有与系统工艺达到最佳匹配，才能取得良好的节能增产效果，因此针对不同的粉磨流程应分别选用不同性能的分级设备，以充分满足系统要求。对于用途相同、特性不同的分级设备由于其工作机理和设备结构等性能方面的差异，即使对于相同的粉磨流程也会给系统带来不同的增产节能效果。因此高效分级设备的设计开发和选择应用，对于整个水泥粉磨系统的节能降耗、优质高产都具有非常重要的作用。目前，与挤压粉磨系统相匹配的适用于辊压料饼的分级设备已得到逐步开发和应用，这其中包括了德国 KHD 公司的 SKS 系列选粉机和 V 型静态选粉机、丹麦 FLS 公司的 Sepax 两级串联式选粉机等多种形式。

目前在国内采用比较广泛的打散分选设备主要有打散分级机和 V 型选粉机两种，其各有优缺点。

3.2.1 打散分级机

已投入生产的预粉磨系统中，大部分厂家采用的分级设备是集打散料饼和筛选粗细颗粒为一体的打散分级机。打散分级机是挤压机的重要设备，集打散分级于一体。挤压料若不经打散分级机，物料颗粒分布宽，一方面会影响下道工序的输送设备的正常运转；另一方面不利于球磨机钢球钢段的级配布置，节能降耗效果不佳。

挤压过的物料进入打散分级机后首先对其进行充分打散。打散是利用离心冲击粉碎的原理，物料在接触到高速旋转的打散盘后被加速，加速过的物料在离心力的作用下，脱离打散盘冲击在反击板上而被粉碎。打散分级机结构如图 3-6 所示。

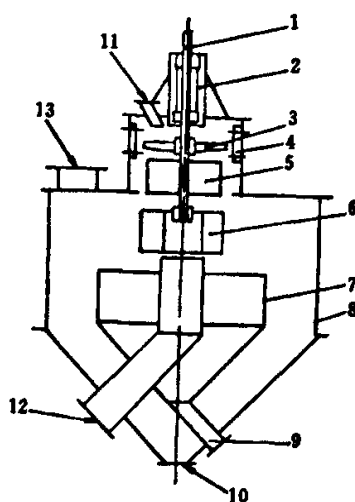


图 3-6 打散分级机结构图

1. 主轴； 2. 轴套； 3. 打散盘； 4. 反击板； 5. 挡料锥；
6. 风轮； 7. 内锥壳体； 8. 外锥壳体； 9. 粗粉卸料口；
10. 细粉卸料口； 11. 进料口； 12. 热风入口； 13. 出风口

该设备是由主轴、进料口、打散盘、挡料锥、风轮、内锥壳体、外锥壳体等组成。主轴通过轴套固定在外锥壳体的顶部盖板上，并由外加动力驱动旋转，利用上述主轴依次吊挂起打散盘和风轮，在打散盘和风轮之间

的位置还通过外锥壳体固定有挡料锥等；另外，还有反击板、热风入口和出风口等。使用时，物料由进料口喂入，落在打散盘上，由于主轴的高速旋转带动打散盘高速旋转，使得落在打散盘上的物料高速飞出撞击到反击板后而被粉碎；由于打散过程是连续的，从反击板上反弹回的物料受到后续物料的再次冲击而被充分粉碎；粉碎后的物料，经由挡料锥导入风轮的风力选粉区内，粗粉运动状态改变较小，落到内锥壳体内，经由粗粉卸料口卸出；而细粉运动状态改变较大，在风力作用下，发生较大的偏移，落入内锥壳体与外锥壳体之中，经由细粉卸料口卸出。在散状物料下落的过程中，由于风轮的高速旋转所产生的负压和出风口后所接的排风机所产生的负压，将热风由热风入口引入，经风轮吹向四周，风轮周围散装物料在悬浮状态中得以烘干，烘干效果较好。

打散分级机的主要技术特点如下：

(1) 传动系统具有明显特点：打散分级机的传动方式采用的是双传动系统，即打散系统与分级系统分别驱动，实现了打散物料和分级物料须消耗不同能量和不同转速的要求；分级系统采用了调速电机驱动，能够方便地调节风轮的转速，从而实现分级不同料径物料的要求。另外，可较方便地调节进球磨和回辊压机的物料量，对生产系统的平衡控制有重要意义；

(2) 分级方式具有显著特点：单位时间处理量大，并且具有很高的粗颗粒回收率，保证入球磨的平均粒径小于 2mm，几乎没有大于 5mm 的颗粒。打散分级机利用风轮的高速旋转产生的向四周辐射的旋转风力场将物料分级。当不同粒径的物料从风轮的四周落下时，由于风轮产生的风力作用，细小颗粒在下落过程中，发生较大的偏移，落入外锥之中，从而实现了分级的目的。实验证明用此方法来分选以 2~3mm 为切割粒径的物料是很经济实用的，并且具有单位时间处理量大的特点。另外，风轮与物料之间无直接接触，所以，风轮的磨损小，使用寿命长。由于采用了调速系统，便于生产系统的平衡控制；

(3) 具有显著的增产节能效果：使用配打散分级机的挤压联合粉磨工艺，可使原球磨系统增产 100%~200%，节电 30% 以上，研磨体消耗降低 60% 以上；

(4) 在工艺布局紧凑和节约土建投资方面起到了很好的效果；

(5) 由于新喂入的物料粒度较大，辊压后的物料中也含有较大的粗颗粒，对设备磨损比较严重，导致打散盘锤头一、两个月就需更换一次。运转率低，运行成本高，检修不方便，影响整个系统的运行；

(6) 在实际运行效果上，打散分级机分选效率低，导致辊压机循环料中细粉含量多而入磨物料又含有大颗粒物料，容易引起辊压机的振动和偏辊现象，不利于辊压机的长期平稳运转，且造成系统的能量浪费。对于较大规模的粉磨系统，打散分级机在单机能力上受限较大，因为能力增大，导致打散盘和主轴直径增大，而直径越大，则越难以保证打散盘的平稳和设备的稳定运行；

(7) 打散分级机设备本身通常存在一个固有缺陷，在打散料饼时往往会使部分粗颗粒飞溅到分级筛的筛下，这样就造成了粗颗粒进入到混合料中。粗颗粒特别是由于辊压机边缘效应产生的粗颗粒的进入，直接影响磨机台产的提高，尤其会对使用料库储存混合料的工艺线形成致命影响。

打散分级机与辊压机构成闭路，可消除因未被充分挤压的物料及边缘漏料对后续球磨系统产生的不良影响，进一步优化磨机系统工况，从而获得大幅度增产节能的效果。

3.2.2 V型选粉机

V型选粉机是联合粉磨系统普遍采用的又一种粗选粉机形式，具有结构简单、耐磨性能好、集打散与分选于一体的特点。其结构如图 3-7 所示。

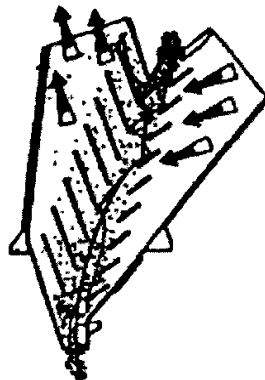


图 3-7 V型选粉机的结构原理图

V 型选粉机本身对产品的细度无法调节, 主要依靠改变风机风量来调节半成品的细度, 因此, V 选风量和风速的控制对选粉机乃至整个系统至关重要。

V 选风量 Q 根据喂料量的大小确定, 正常按 4kg/m^3 的喂料浓度配风, 最大不超过 4.5kg/m^3 , 以保证分散效果。

举例来说, V 选导流板间的设计风速 6.7m/s 左右, 半成品的比表面积可以达到 $1500\text{cm}^2/\text{g}$, 实际测定风速 5.8m/s 时, 比表面积 $1850\text{cm}^2/\text{g}$ 。说明风速降低, 半成品变细, 适合生产高标号水泥; 反之, 如要生产低标号水泥, 必须保证一定的风速, 降低半成品的细度, 否则辊压机和球磨机的粉磨能力难以平衡。

设计选型时应确认风机的性能曲线满足调节要求并有一定的富余, 生产中减少设备的漏风, 放风量小时补充适量的冷风。

但是, V 型选粉机属粗选粉, 其分离粒度约 $500\mu\text{m}$, 中间成品比面积约 $2000\text{cm}^2/\text{g}$, $R80\mu\text{m}$ 细度达 30%, 并含有少量 $>1\text{mm}$ 的粗颗粒。虽然排风时用旋风筒预收, 但其浓度达 1000g/m^3 , 在旋风筒中进行浓相分离, 因干扰沉降的作用, 排出气体中难免含有较粗颗粒。这不符合水泥成品的要求: P.I 水泥, $R80\mu\text{m}<0.5\%$; P.O42.5, 水泥 $R80\mu\text{m}<11\%$ 。

V 型静态选粉机根据静态两项流折流原理设计而成, 分级过程是气体在作 90° 折向流动过程中进行的, 设备压损较小, 所需空气量少, 料气比可达到 $4\sim5\text{kg/m}^3$ 。该设备的主要特点为:

(1) 结构简单, 无运动部件, 也无需任何动力, 不需配置诸如润滑、冷却等传统辅助设备, 大大降低了维修工作量;

(2) 对辊压后的物料和新喂入的物料适应性强, 打散能力强, 分选效率高, 可以将物料中一定粒度的细粉有效选出, 大大提高系统粉磨能力, 降低粉磨能耗, 同时十分有利于辊压机的操作和运行;

(3) 半成品粒度调节灵活。通过对通风盆调节, 可以灵活调节半成品粒度;

(4) V 型静态选粉机基本不受规格限制, 而且无论规格大小, 设备运转都相当平稳, 具有非常好的实用性;

(5) 结构紧凑, 电耗低。

选粉设备只有与系统工艺达到最佳匹配, 才能取得良好的节能增产效

果。通过大量的工程设计和生产实践,我们发现由 v 型选粉机和辊压机组成的联合粉磨工艺,无论是在工程设计还是在生产改造方面,都充分体现了优质、高产、低消耗的先进设计理念。

3.2.3 两种分级设备的比较

两种分级系统的主要区别在于:

(1) 分级原理、分级精度:“V 型选粉机”完全靠风力提升分选,分级精度较高。适合分选 0.5mm 以下的物料;“打散分级机”机械与风力结合,分级精度较低,分选粒径可达 3.0mm;

(2) 分级系统的装机功率、复杂程度和日常维护费用:“V 型选粉机”设备本身结构简单,无回转部件,但系统复杂。磨损主要集中在隔板、管道、旋风筒、循环风机等;“打散分级机”有回转部件,设备结构相对复杂,但系统简单。磨损主要是内部的风轮、打散盘、衬板等;

(3) 系统电耗:“V 型选粉机”系统辊压机和球磨机主机电耗低,输送和分选电耗高;“打散分级机”辊压机和球磨机电耗略高,输送和分选电耗低。分选 0.5mm 以下物料时,“V 型分级机”系统占优,反之“打散分级机”占优;

(4) 对辊压机工艺参数的要求:“V 型分级机”系统必须采用低压大循环操作方式,否则料饼无法打散,更无法选出料饼中挤压好的细粉。要求辊压机磨辊长径比大;KHD 公司采用“V”选粉机时,2×800kW(或 900kW)的辊压机,一般只配到产量<150t/h 的系统中,而在大陆江西瑞昌 KHD 公司保证值在 220t/h 的带“V”型分级机系统中,配置了 2×1500kW($\Phi 1700 \times 1800$)的辊压机;“打散分级机”可以采用高压小循环操作方式。磨辊长径比应小一些。

两种分级系统的选择条件比较:

(1) 装机功率比:“V”系统中辊压机规格必须足够大,以保证产生足够量 0.5mm 以下的细粉供“V”型选粉机分选。因此,辊压机与球磨机装机功率比应该在 1: 1.0~2.5 (开路), 1: 1.0~2.0 (闭路)。

“打散分级”系统中,辊压机与球磨机装机功率比在 1:2.5 ~3.5。若比值再加大,随着辊压机在粉磨系统中所起作用的降低,系统电耗随之增

加。

(2) 物料水分：应用于水泥粉磨的“V”系统，水分 $\leq 1.0\%$ ；“打散分级”系统水分 $\leq 15\%$ ；如配料中有高水分原料（如矿渣），则应单独烘干，不允许在磨系统中通热风，以防石膏脱水。不同工艺要求的分级设备配置见表 3-2。

表 3-2 不同工艺要求的两种分级设备配置

使用厂家	国产福建	内蒙冀东	江西瑞昌	上海 崛 荣	山东山铝
辊压机	2×1120kW	2×1120kW	2×1500kW	2×500kW	2×500kW
分级设备	V 型选粉机	V 型选粉机	V 型选粉机	打散分级机	打散分级机
球磨机	3550kW (闭路)	3150kW (开路)	3150kW (闭路)	3550kW (开路)	2500kW (开路)
装机功率比	0.63	0.71	0.97	0.28	0.40
磨 辊 直 径 (mm)	1600	1600	1700	1400	1400
磨 辊 宽 度 (mm)	1400	1400	1800	800	650
磨辊长径比	0.88	0.88	1.06	0.57	0.46
磨辊线压力 (t/cm)	5.2	5.0	4.8	6.3	6.25
水泥品种	P·O42.5	P·O42.5	P·O42.5	P·O42.5	P·O42.5
产 量 指 标 (t/h)	180	170	180~230	135	110

目前我国煤、电紧张状况有目共睹，仅以 2004 年为例，水泥行业就饱受煤、电、运输紧张之苦。许多省份和地区都相继采取用电高峰期对企业拉闸限电、鼓励企业在用电低谷期开机运转等企业让电与民的措施，以缓解当前能源紧张状况；同时每吨水泥的成本也因煤、电、运输涨价而上升 50~ 80 元。针对目前这种能源紧缺状况，优先选用先进成熟的粉磨技术以及高效节能的粉磨设备，既可以最大限度地降低水泥生产成本，又可以从容应对目前的电力紧张状况。由于有高效的生产能力作保证，企业的

生产就可以避开用电高峰期，并充分利用用电高峰和低谷的电价差额，灵活进行指挥和调度，先进的技术和高效的设备必将为企业带来丰厚的经济回报。

辊压机料床粉磨技术是一项先进而成熟的水泥粉磨技术，这在国内外的大量工程实践中已得到了充分证实。随着目前能源紧缺趋势的不断恶化，辊压机料床粉磨技术必将具有广阔的发展前途和较大的应用空间，在为企业创造丰厚经济效益的同时，也必将为目前存在严重能源危机的社会带来良好的社会效益。

第 4 章 辊压机粉磨系统的稳态模型

4.1 粉磨过程的数学模型

围绕粉磨过程的优化问题，多年来人们做了大量的工作，这包括粉碎机理解析、设备结构和材质改进、工艺参数最佳化及过程优化控制等。这些研究与描述粉磨过程和参数关系的数学模型密切相关，同其他工业过程一样，数学模型研究是过程分析和优化研究的基础。由于粉磨过程的复杂性和不同时期科学研究手段的局限，粉磨过程数学模型和优化研究至今没有得到令人满意的结果。

粉磨过程中的典型变化是被粉碎物料颗粒在复杂外力因素作用下粒度变细（Size Reduction）的过程，随着人们对粉碎过程认识的逐渐深入和计算技术的进步，描述这一过程以及各参变量关系的数学模型不断地演化发展：从类似化学反应动力学的 1 阶到 n 阶动力学模型、从线性到非线性，从以大型计算机为基础的解析模型到能量关系模型等。

4.1.1 解析模型

作为粉磨过程解析模型最初是由爱泼斯汀(Epstein)在 1948 年提出的。他从统计观点确立了分别描述颗粒破碎概率的选择函数和破碎产物粒度分布的破裂分布函数，并建立了如下微分—积分方程：

$$P_p(x) = \int_0^x dP_{p-1}(y) + \int_x^\infty \pi \cdot B(x, y) \cdot dP_{p-1}(y) \quad (4-1)$$

式中， $p_p(x)$ ——第 p 次粉磨破碎产物中粒径小于 x 的质量比；

π ——表示不同粒级颗粒受粉碎作用的概率（选择函数）；

$B(x, y)$ ——表示粒径为 y 的颗粒被粉碎后生成粒径为 x 的颗粒质量比。

1953 年斯得拉斯克(Sedlatshek)和贝斯(Bass)将粉磨过程中粒度随时间变化用类似化学分解反应模型的方法进行了描述，建立了如下矩阵微分方程组：

$$dM/dt = V \cdot M \quad (4-2)$$

其中:

$$M = [m_1, m_2, \dots, m_n]^T$$

$$V = \begin{bmatrix} -v_{1,1} & \dots & \dots & 0 \\ v_{2,1} & -v_{2,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n,1} & v_{n,2} & \dots & -v_{n,n} \end{bmatrix}$$

$V_{i,j}$ 为 j 粒度区间颗粒受到粉磨作用后, 在单位时间内移向 i 粒度区间的质量比, 由于它包含了颗粒被粉碎概率和破裂粒度分布两个方面内容, 故很难确定其值大小。

1956 年 Broadbent 和 Callcott 在 Epstein 的基础上, 导出了粉磨过程的静态矩阵模型:

$$P = \{B\Omega + (I - \Omega)\}F = DF \quad (4-3)$$

其中:

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_n)^T$$

$$F = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T$$

$$P_i = \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} \omega_j f_j + (1 - \omega_i) f_i$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1 & \dots & \dots & 0 \\ b_2 & b_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_n & b_{n-1} & \dots & b_1 \end{bmatrix}$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \omega_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \omega_m \end{bmatrix}$$

式中, P 、 F ——分别为粉磨产物和原料粒度分布向量;

Ω 、 B ——分别为选择矩阵和分布矩阵;

I 、 D ——分别为单位矩阵和破碎矩阵。

对于多阶段进行的批次粉磨过程, 有如下静态矩阵模型:

$$P_p = D_p \cdot F \quad (4-4)$$

1984 年对选择矩阵 Ω 进行了修正, 即认为不同粒级颗粒被粉磨的选择函数随过程进行是不断变化的, 因而提出如下动态矩阵模型:

$$P_p = \left[\prod_{i=1}^p D_i \right] F \quad (4-5)$$

对上式曾用石灰石等矿物批次粉磨过程进行了计算机模拟和实验验证。

1962 年 Gaudin 与 Meloy 等人利用 Bass 建立的微分方程, 将选择函数和分布函数以连续函数形式来表示, 建立了如下偏微分-积分方程:

$$\frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial t \partial x} = -S(x) \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} + \int_{-x}^{\infty} \frac{\partial P(y,t)}{\partial y} S(y) \frac{\gamma(y-x)^{r-1}}{y^r} dy \quad (4-6)$$

同年 Gardner 和 Austin, 对连续粉磨过程建立了如下微分-积分方程:

$$P(x,t) = P(x,0) + \int \int_{-x}^{\infty} s(y) \cdot B(y,x) dy dt \quad (4-7)$$

Filippov 从纯数学角度对粉磨过程的研究, 也得到了同上式相同的模型。

以上各种解析模型的建模思想都是基于粉磨函数和破裂分布函数(BS 模型), 其相互之间也存在着可以用数学演算进行相互转换的规律。迄今, 在欧美一些国家中对粉磨过程的研究基本上没有脱离 BS 模型框架。

结合 BS 模型优点并考虑物料在磨机内部运动特性及产品排出特性, 曾根据化工原理中混合扩散与传质原理建立了连续粉磨过程的传输-粉磨-排料模型, 使给料、磨内状态和产品粒度分布之间建立了明确数学关系。

BS 模型为了解析粉磨过程, 引入了大量难以准确测定的选择函数和破裂分布函数, 在数学上达到了很完善的程度, 但由于缺少磨机操作工艺参数, 使模型应用受到了限制。因此, 近年来对 BS 模型进行了改造, 以输入能量代替时间参数, 将选择函数表示为能量输入与磨内物料滞留量的函数等。

4.1.2 动力学模型

粉磨动力学模型基于粉磨速度,即粗大颗粒(大于指定粒级)消失速率与参加粉磨的粉体中这些大颗粒所占比率成正比,同化学反应动力学方程相类似,可以用如下模型来表示:

$$x(t) = x_0 \exp(-kt^n) \quad (4-8)$$

式中, x_0 ——给料中大于指定粒级颗粒的比率;

$x(t)$ ——经过 t 时间粉磨后的产品中大于指定粒级颗粒的比率;

k ——相当于该指定粒级以上大颗粒被粉磨的选择函数。

式(4-8)称之为 n 阶动力学方程。考虑给料和产品整个粒度分布时有:

$$R_i(t) = R_i(0) \exp(-k_i t^{n_i}) \quad (4-9)$$

式中, $i=1,2,\dots,j$

$R_i(0)$ 、 $R_i(t)$ ——分别为给料和产品中大于 i 粒级的累积比率;

j ——对给料和产品人为划定的窄粒级数目。

考虑到式(4-9)中的 k_i 和 n_i 值是颗粒粒度的函数,推导出了将物料粒度分布与动力学相结合的新动力学模型:

$$R_d = R_0 \exp[-k(d)t^{n(d)}] \quad (4-10)$$

实验研究表明,这种新动力学模型不仅精度高,而且应用范围广。

粉磨动力学模型还被推广到批次磨矿线性迭加模型,把产品中各粒级产率与介质配比联系起来,扩展了动力学模型应用范围。

以上粉磨动力学模型仅适用于批次粉磨过程,为了开拓它在连续回路中的应用,将磨机处理能力等参数引入模型,推出了连续粉磨过程动力学模型:

$$R_i = R_0 \exp(e^{B_0} \cdot q^{B_1+B_2 \ln q}) \quad (4-11)$$

动力学模型与 BS 解析模型相比,结构简单,求解方便,但所采用的参数太少,而不能全面反映粉磨过程特征和参变量间定量关系,难以应用于粉磨过程模拟、优化研究。

4.1.3 相似模型

随着物理学中相似理论及其工业应用的发展,自五十年代开始就有学者将相似理论方法应用于粉磨过程研究并建立了相应的数学模型。具有代表性的有沈自求、Andreason 等人。沈自求根据相似理论分析了粉碎功耗问题,并用圆盘式粉碎机和颚式破碎机进行了实验验证,得到了与理论模型相符的结论。Andreason,以长度、时间和受力三个基本相似条件为依据,对多种类型的破碎粉磨设备进行被粉碎物料受力变形和能耗的相似分析,得到了能耗与产品粒度及给料粒度之间关系的模型。孙玉波教授应用相似原理方法对小型实验磨机数据进行了综合整理,建立了表达球磨机处理能力的准数方程,并进行了工业化模拟过渡的计算验证。

以上的几种模型和方法主要从受力相似、变形相似、几何相似三个方面分析了粉磨过程。由于缺少全面工艺参数,这种模型还不能系统地描述粉磨过程;然而,过程相似性反映了同类型粉磨过程和设备在不同规模下工作的本质联系,相似准数包括了各个参变量之间具有明确物理意义的关系。从这点来看,以相似准数为基本变量建立过程数学模型有其独特优点:即可以在小型模拟实验基础上预计到工业生产所能达到的结果和所应用的操作条件,借助模拟试验为大型设备提供基本参考数据,减少工作盲目性。

在涉及固体物料粉磨的大规模工业生产中,粉磨设备通常和分级设备一起组成闭路循环来完成特定的工艺目的。加工流程所处理的物料,一般需要经过多个破碎和粉磨阶段才能达到后续作业对物料的粒度要求,在破碎工段,最后一段的破碎作业往往与筛分作业构成闭路循环来使入磨物料满足粒度要求;在粉磨工段,尤其是在取得最终粉磨产品的粉磨阶段,闭路粉磨是最常见的选择。采用闭路粉磨主要是从两个方面考虑,一使物料达到给定的细度要求,二是降低所需的粉碎能耗并减少过粉磨。对于采用粉磨介质的磨机诸如球磨机、振动磨和搅拌磨等设备的粉磨作业,不加分级作业虽然也可生产出满足一定细度要求的产品,但是所需的能量消耗会更高。一般只有在尚无有效分级方法可用的情况下(如在超细粉碎领域),或者在能耗费用与总费用比较不显著的情况下,才会选择放弃闭路粉磨。对于采用挤压粉碎原理的磨机如水泥工业常用的立式磨和辊压机由于施

载后物料中最大颗粒的粒度仍会与施载前物料中最大颗粒粒度或是与辊间距离尺寸大致相当,粉磨产品必须通过分级机才能取得满足细度要求的产品。在工业生产中,立式磨一般带有与之集成的选粉机,辊压机也常与外部的分级设备组成闭路循环作业。众所周知,固体物料的粉碎是一个高能耗过程,粉碎流程整体的效率与工艺流程设计、各单元作业设备选择及其操作条件的设定有很大的关系。工业规模的破碎粉磨试验研究耗费巨大,而且研究的内容和范围还会受到种种实际条件的制约。利用建立数学模型及仿真计算的方法,可以在对粉碎回路的研究和优化中减少所需的试验工作量,拓宽研究范围并有可能探索更多的方案选项,达到事半功倍的效果。

4.2 基于料床粉磨设备的联合粉磨系统的稳态模型

对于一个连续粉磨系统来说,系统处于动态平衡时的工作状态为稳定状态,此状态下各变量的均值不随时间而变;即系统在入料流量及所有设备工作状况恒定条件下应达到的一个稳定工作点。本文中的稳态模型即是在这种状态下所建立的。

粉磨流程包含粉碎和分级这两种基本的单元作业,作为建模的基础,首先给出粉碎和分级单元作业的数学模型。为了表述的简洁起见,采用列矩阵来表示物料的粒度分布并用矩阵方程表达单元作业模型。

4.2.1 粉碎和分级的单元作业模型^[36]

将物料颗粒按照其尺寸大小划分为 n 个粒级,则磨机给矿和产品的粒度组成可分别用一个 $n \times 1$ 列矩阵来表示:

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \text{ 和 } p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix}$$

矩阵元素 f_i 和 p_i 分别为给矿和产品中第 i 粒级 ($i=1,2,\dots,n$) 所占的质量分

数并满足 $\sum_{i=1}^n f_i = 1$ 和 $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ 。需要注意的是对粒级的标记方法,在建模时

通常的约定是粒级越细，下标值越大。这里也采用这种方法。若不考虑磨机中可能存在的颗粒团聚行为，可以用一个 $n \times n$ 的下三角矩阵 M 来综合表达磨机中各粒级物料的粉碎行为，这里称之为粉碎矩阵。

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix}$$

粉碎矩阵的元素 m_{ij} 表示第 j 粒级物料通过磨机后进入第 i 粒级的质量分数。显然粉碎矩阵的每一列都应满足所有元素之和为 1 这个条件。采用粉碎矩阵，粉碎作业模型可表示为

$$p = Mf \quad (4-12)$$

对于窄粒级物料的粉碎行为，粉碎数模领域的研究者常用选择函数（也称碎裂分数）和碎裂函数这两套参数来表征。选择函数即窄粒级物料经粉碎后离开该粒级（进入所有更细粒级）部分的质量分数；碎裂函数则是这部分碎块的粒度分布函数。利用这两套参数，粉碎矩阵的元素 m_{ij} 可表示为

$$m_{ij} = \begin{cases} 0 & (i < j) \\ 1 - S_i & (i = j) \\ b_j S_j & (i > j) \end{cases}$$

其中 S_j 为第 j 粒级物料的选择函数；粒级分配系数 b_j 为离开第 j 粒级的物料中进入第 i 粒级物料的质量分数，可由第 j 粒级的碎裂函数在第 i 粒级的上下界值求差算得。

分级作业也可采用矩阵方程来表达。为此先定义一个 $n \times n$ 的对角矩阵 C ，并称之为分级矩阵：

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

其对称线上的元素 c_y 表示第 i 粒级物料经分级后进入粗粒产品的质量分数。若用 $n \times 1$ 列矩阵 f_c 、 p_c 和 p_R 分别表示分级机给矿、细粒产品（溢流）和粗粒产品（沉砂）的粒度分布，则由分级作业物料平衡模型可导出产品粒度分布和产率的计算式如下：

$$p_R = \frac{1}{r} C f_c \quad (4-13)$$

$$f_c = r p_R + (1-r) p_c \quad (4-14)$$

$$r = \sum_{i=1}^n c_i f_{c,i} \quad (4-15)$$

其中 r 为粗粒产品相对于分级机给矿的产率。

粉碎矩阵和分级矩阵分别表征了粉磨设备和分级设备的工作状况。现实粉磨设备和分级设备的工作原理看，它们均受到给矿流量（生产能力）及其粒度组成的影响，这两个矩阵各元素的取值原则上需通过理论分析或实验测定来确定。若能知道给矿流量变化对这两个矩阵的影响，上述矩阵模型也可用于设备及系统工作状况的动态分析。然而至今为止，此类模型更多的是用于设备及系统的稳态工作状况计算，本文下面的讨论也仅限于系统的稳态仿真计算。

建模和仿真计算的目标是在给定系统新给矿的流量及其粒度组成、给定粉碎及分级设备工作参数的条件下，应用粉碎作业模型来定量描述粉碎前后物料粒度组成的变化以及应用分级作业模型来定量描述物料中各粒级经过分级后的走向分配情况，并在此基础上通过物料平衡原理计算回路中所有物料流的流量及其粒度组成。这里的物料平衡包括固体物料总量的平衡以及每个粒级物料量的平衡。

在联合粉磨系统中，有两种基本的实现形式：新給料首先进入分级设备，使用于物料中已经含有较多合格细颗粒的情况；新給料首先进入磨机，这种比较常见。以下就逐一进行分析。

4.2.2 分级设备前置的辊压机联合粉磨系统的稳态模型

笔者根据 Broadbent 和 Callcott 在 Epstein 的基础上的研究^[36]，建立了

系统的物料平衡关系如图 4-1 所示。

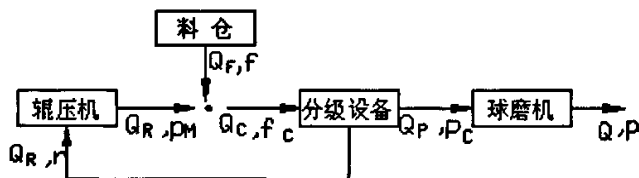


图 4-1 系统物料平衡关系图

图中, f , p_M , f_C , r , p_C , p 表示各段物料的粒度组成, 均为 $n \times 1$ 矩阵, 其元素为各粒级所占的质量分数, 所以各元素之和等于 1; Q_F , Q_R , Q_C , Q_P , Q 表示各段物料流量, 单位为 t/h。

在进行有关粉磨物料平衡的分析计算时, 应列出物料的平衡关系式。

由于球磨机的产品流量与粒度很容易测得, 所以建平衡关系式时, 暂不考虑。采用下三角矩阵 M 表示辊压机的粉碎能力矩阵, 用对角矩阵 C 表示分级设备的分级能力矩阵。

由图 4-1 可列出下列平衡关系式表示系统中各物料流的流量和粒度组成:

$$p_M = Mr \quad (4-16)$$

$$Q_R p_M + Q_F f = Q_C f_C \quad (4-17)$$

$$Q_R r = C Q_C f_C \quad (4-18)$$

$$Q_R r + Q_P p_C = Q_C f_C \quad (4-19)$$

这 4 个矩阵方程式中的每一项都是一个 $n \times 1$ 列矩阵 (向量)。每个矩阵方程式实际上都包含了 n 个分量 (标量) 方程, 各自描述一个粒级的质量平衡。对方程式 (4-17) 和 (4-19) 将各自的 n 个分量式的左右两边分别进行加和, 再考虑到所有表示物料粒度组成分布的列矩阵元素都应满足

的归一化条件 (例如对于 f 各元素的加和应有 $\sum_{i=1}^n f_i = 1$), 随即可得:

$$Q_R + Q_F = Q_C \quad (4-20)$$

$$Q_R + Q_P = Q_C \quad (4-21)$$

这 2 个式子表示了回路中各物料流总量的平衡关系。注意这里总量平衡式不是作为独立的式子列出, 而是从对 n 个粒级平衡关系式进行加和得到的。当然, 建模时也可先将总量平衡作为独立的等式列出, 那么与之相

应的独立的粒级平衡式实际上为 $n-1$ 个。

式 (4-20) 和式 (4-21) 相减可得：

$$\begin{aligned}(Q_R + Q_F) - (Q_R + Q_P) &= Q_C - Q_C \\ Q_F - Q_P &= 0 \\ Q_F &= Q_P\end{aligned}\quad (4-22)$$

在分析和计算时通常用物料的相对流量代替绝对流量，这里以系统回路产品流量 Q_P 为基准来定义各相对流量：

$$q_R = Q_R / Q_P, \quad q_P = Q_P / Q_P = 1, \quad q_F = Q_F / Q_P = 1, \quad q_C = Q_C / Q_P$$

其中 q_R 一般称为返砂比（也称循环负荷），在本系统中亦即辊压机的负荷系数； q_C 称为分级设备的负荷系数。利用相对流量，前述的物料平衡方程式可表示为：

$$p_M = Mr \quad (4-23)$$

$$q_R p_M + q_F f = q_C f_C \quad (4-24)$$

$$q_R r = C q_C f_C \quad (4-25)$$

$$q_R r + q_P p_C = q_C f_C \quad (4-26)$$

$$q_R + q_F = q_C \quad (4-27)$$

$$q_R + q_P = q_C \quad (4-28)$$

需要指出的是，这里的返砂比是以返砂固体流量与回路产品也就是分级机溢流的固体流量之比来定义的。在一些教科书中，返砂比的定义是磨机总给矿中来自返砂的固体流量与来自新给矿的固体流量之比。以回路产品（分级机溢流）为基准来定义返砂比，不仅能对两种回路的情况进行统一处理，而且这个定义只与分级结果有关，更能体现分级机工作状态对回路性能的影响。

系统的稳态，是指系统在新给矿流量及所有设备工作状态恒定条件下应达到的一个稳定工作点，系统运行开始时，要经一个返砂量由少到多增加并趋于稳定的过渡过程，系统产品量相应地也是由少到多后趋于稳定。生产实践中一般可用返砂量或回路产品量恒定、且新给矿量等于回路产品量，即

$$Q_F = Q_P \quad \text{或} \quad q_F = q_P = 1$$

作为回路已达到稳态的判据。从理论上讲，在保持系统新给矿流量和粒度组成恒定，保持所有设备工作状态恒定条件下，达到稳态时系统中所有的

物料流的流量和粒度组成都应趋于稳定。系统稳态计算的目标就是求出稳态时所有这些物料流的流量和粒度组成。

将式 (4-23) 代入式 (4-24):

$$\begin{aligned} q_R M r + q_F f &= q_C f_C \\ M q_R r + q_F f &= q_C f_C \end{aligned}$$

再将式 (4-25) 代入上式:

$$\begin{aligned} M C q_C f_C + q_F f &= q_C f_C \\ q_F f &= (I - M C) q_C f_C \\ q_C f_C &= (I - M C)^{-1} f \end{aligned}$$

其中 I 为 $n \times n$ 单位矩阵。将列矩阵 $q_C f_C$ 记为 f^*_C , 则有

$$f^*_C = q_C f_C = (I - M C)^{-1} f \quad (4-29)$$

算出 f^*_C 后, 可很容易由 (4-23) ~ (4-26) 式推出在已知 q_F 、 f 以及 M 和 C 条件下, 所有其他未知量的计算式。

a. 对于出辊压机的物料:

由式 (4-24) 得:

$$q_R p_M = q_C f_C - q_F f$$

将式 (4-29) 代入上式:

$$\begin{aligned} q_R p_M &= (I - M C)^{-1} f - q_F f \\ &= [(I - M C)^{-1} - I] f \end{aligned}$$

将列矩阵 $q_R p_M$ 记为 p^*_M , 应用关于 p 的归一化条件可得:

$$q_R = \sum_{j=1}^n q_R p_{M,j} = \sum_{j=1}^n p^*_{M,j} \quad (4-30)$$

$$\text{则} \quad p_M = \frac{1}{q_R} [(I - M C)^{-1} - I] f \quad (4-31)$$

b. 对于出分级设备的产品:

式 (4-25) 代入式 (4-26):

$$\begin{aligned} C q_C f_C + q_P p_C &= q_C f_C \\ q_P p_C &= (I - C) q_C f_C \\ p_C &= (I - C) q_C f_C \end{aligned}$$

将式 (4-29) 代入上式:

$$p_c = (I - C)(I - MC)^{-1}f \quad (4-32)$$

c. 对于回路返砂:

式 (4-29) 代入式 (4-25):

$$\begin{aligned} q_R r &= C q_c f_c \\ &= C (I - MC)^{-1}f \end{aligned}$$

将列矩阵 $q_R r$ 记为 r^* , 应用关于 r 的归一化条件可得:

$$q_R = \sum_{i=1}^n q_R r_i = \sum_{i=1}^n r_i^* \quad (4-33)$$

$$\text{则} \quad r = \frac{1}{q_R} C (I - MC)^{-1}f \quad (4-34)$$

d. 对于分级设备入料:

由关于 f_c 的归一化条件, 可知

$$q_c = \sum_{i=1}^n q_c f_{c,i} = \sum_{i=1}^n f_{c,i}^* \quad (4-35)$$

由式 (4-29) 可得:

$$f_c = \frac{1}{q_c} (I - MC)^{-1}f \quad (4-36)$$

4.2.3 分级设备后置的辊压机联合粉磨系统的稳态模型

分级设备后置的辊压机联合粉磨系统的物料平衡关系如图 4-2 所示。

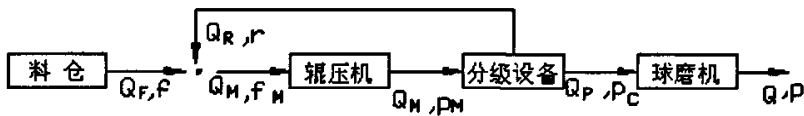


图 4-2 分级设备后置的辊压机联合粉磨系统的物料平衡关系图

图中, f, f_M, p_M, r, p_C, p 表示各段物料的粒度组成, 均为 $n \times 1$ 矩阵, 其元素为各级级所占的质量分数, 所以各元素之和等于 1; $Q_F, Q_R,$

Q, Q_P, Q_M 表示各段物料流量, 单位为 t/h。

同样采用下三角矩阵 M 表示辊压机的粉碎能力矩阵, 用对角矩阵 C 表示分级设备的分级能力矩阵。

由图 4-2 可列出下列平衡关系式表示系统中各物料流的流量和粒度组成:

$$p_M = M f_M \quad (4-37)$$

$$Q_R r + Q_F f = Q_M f_M \quad (4-38)$$

$$Q_R r = C Q_M p_M \quad (4-39)$$

$$Q_R r + Q_P p_C = Q_M p_M \quad (4-40)$$

这 4 个矩阵方程式中的每一项都是一个 $n \times 1$ 列矩阵 (向量)。每个矩阵方程式实际上都包含了 n 个分量 (标量) 方程, 各自描述一个粒级的质量平衡。对方程式 (4-38) 和 (4-40) 将各自的 n 个分量式的左右两边分别进行加和, 再考虑到所有表示物料粒度组成分布的列矩阵元素都应满

足的归一化条件 (例如对于 f 各元素的加和应有 $\sum_{i=1}^n f_i = 1$), 随即可得:

$$Q_R + Q_F = Q_M \quad (4-41)$$

$$Q_R + Q_P = Q_M \quad (4-42)$$

这 2 个式子表示了回路中各物料流总量的平衡关系。

式 (4-41) 和式 (4-42) 相减可得:

$$\begin{aligned} (Q_R + Q_F) - (Q_R + Q_P) &= Q_M - Q_M \\ Q_F - Q_P &= 0 \\ Q_F &= Q_P \end{aligned} \quad (4-43)$$

以系统回路产品流量 Q_P 为基准来定义各相对流量:

$$q_R = Q_R / Q_P, \quad q_P = Q_P / Q_P = 1, \quad q_F = Q_F / Q_P = 1, \quad q_M = Q_C / Q_M$$

利用相对流量, 前述的物料平衡方程式可表示为:

$$p_M = M f_M \quad (4-44)$$

$$q_R r + q_F f = q_M f_M \quad (4-45)$$

$$q_R r = C q_M p_M \quad (4-46)$$

$$q_R r + q_P p_C = q_M p_M \quad (4-47)$$

$$q_R + q_F = q_M \quad (4-48)$$

$$q_R + q_P = q_M \quad (4-49)$$

新给矿直接进入辊压机, 而且稳态时回路产品固体流量等于新给矿的固体流量, 与教科书中返砂比的定义一致。

将式 (4-44) 左右两边各乘以 q_M :

$$\begin{aligned} p_M &= M f_M \\ q_M p_M &= q_M M f_M \\ q_M p_M &= M q_M f_M \end{aligned}$$

将式 (4-45) 代入上式:

$$q_M p_M = M (q_R r + q_F f)$$

再将式 (4-46) 代入上式:

$$\begin{aligned} q_M p_M &= M (C q_M p_M + q_F f) \\ q_M p_M - M C q_M p_M &= M q_F f \\ (I - M C) q_M p_M &= M q_F f \\ q_M p_M &= (I - M C)^{-1} M q_F f \\ &= (I - M C)^{-1} M f \end{aligned}$$

其中 I 为 $n \times n$ 单位矩阵。将列矩阵 $q_M p_M$ 记为 f^*_M , 则有

$$f^*_M = q_M p_M = (I - M C)^{-1} M f \quad (4-50)$$

算出 f^*_M 后, 可很容易由 (4-44) ~ (4-47) 式推出在已知 q_F 、 f 以及 M 和 C 条件下, 所有其他未知量的计算式。

a. 对于出辊压机的物料:

由关于 p_M 的归一化条件, 可知

$$q_M = \sum_{j=1}^n q_M p_{Mj} = \sum_{j=1}^n p^*_{Mj} \quad (4-51)$$

由式 (4-50) 可得:

$$p_M = \frac{1}{q_M} (I - M C)^{-1} M f \quad (4-52)$$

b. 对于出分级设备的产品:

由式 (4-47) 可得:

$$\begin{aligned} q_P p_C &= q_M p_M - q_R r \\ p_C &= q_M p_M - q_R r \end{aligned}$$

将式 (4-46) 代入上式:

$$\begin{aligned} p_C &= q_M p_M - C q_M p_M \\ &= (I - C) q_M p_M \end{aligned}$$

再将式 (4-50) 代入上式:

$$p_C = (I - C) (I - MC)^{-1} M f \quad (4-53)$$

c. 对于回路返砂:

将式 (4-50) 代入式 (4-46):

$$\begin{aligned} q_R r &= C q_M p_M \\ &= C (I - MC)^{-1} M f \end{aligned} \quad (4-54)$$

将列矩阵 $q_R r$ 记为 r^* , 应用关于 r 的归一化条件可得:

$$q_R = \sum_{i=1}^n q_R r_i = \sum_{i=1}^n r_i^* \quad (4-55)$$

则

$$r = \frac{1}{q_R} C (I - MC)^{-1} M f \quad (4-56)$$

d. 对于辊压机入料:

由式 (4-45) 得:

$$\begin{aligned} q_M f_M &= q_R r + q_F f \\ &= q_R r + f \end{aligned}$$

将式 (4-54) 代入上式:

$$\begin{aligned} q_M f_M &= (I - MC)^{-1} M f + f \\ &= [(I - MC)^{-1} M + I] f \end{aligned}$$

由上式可得:

$$f_M = \frac{1}{q_M} [(I - MC)^{-1} M + I] f \quad (4-57)$$

5.1 内蒙古冀东水泥有限责任公司水泥粉磨系统介绍

42

物料在库底配料后,经皮带输送机送至进料提升机,皮带输送机上方设有一台悬挂式电磁除铁器,能有效地除去混在输送物料中的含铁件,以保护辊压机辊子不受损伤。然后再进入 V 型选粉机,经分级后小于 0.5mm 的细粉直接与粉煤灰混合后入球磨机粉磨,大于 0.5mm 的颗粒则喂入稳流称重仓,物料在稳流称重仓中混合后,靠自重通过进料装置的可调节两个斜插板以料柱形式连续、均匀地喂入辊压机进行破碎、挤压,经过挤压后的料饼与新喂入的物料一起再次由进料提升机送入 V 型选粉机进行分级,粗粉入辊压机,细粉入球磨机,开路球磨机粉磨后的成品经磨尾提升机送入水泥库中。

该系统的主要设备配置如表 5-1 所示。

表 5-1 系统主要设备配置表

名称	型号规格	性能与参数
辊压机	HFCG160-140; $\phi 1600 \times 1400\text{mm}$	通过能力: 670~800t/h; 辊子线速度: 1.58m/s; 电机功率: 1120×2kw
球磨机	$\phi 4.2 \times 13\text{m}$, 三仓	生产能力: 175t/h; 转速: 15.75r/min; 研磨体装载量: 220t
V 型选粉机	V3000	通过量: 900t/h; 选粉风量: 220000m ³ /h

5.2 系统能耗分析

针对内蒙古冀东水泥有限责任公司呼市水泥分厂采用的联合粉磨系统,利用分级设备前置的辊压机联合粉磨系统的稳态模型进行分析。

将物料分为<0.5mm, 0.5~3mm, 3~10mm, 10~15mm, 15~20mm, 20~25mm, >25mm 七个粒级,由于该系统所采用的 V 型选粉机选出的是 0.5mm 以下的细粉,所以

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

从实际生产中测得 r 、 p_M ，利用式 (4-23) 可求得

$$M = \begin{bmatrix} 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.28 & 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.19 & 0.41 & 0.32 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.04 & 0.14 & 0.27 & 0.48 & 0 & 0 & 0 \\ 0.13 & 0.05 & 0.15 & 0.31 & 0.62 & 0 & 0 \\ 0.09 & 0.08 & 0.10 & 0.06 & 0.32 & 0.59 & 0 \\ 0.02 & 0.06 & 0.16 & 0.15 & 0.06 & 0.41 & 1 \end{bmatrix}$$

实际生产中，辊压机处理量 Q_R 为 700t/h，从新喂料处取样分析，粒度分布如表 5-2 所示。

表 5-2 新喂入物料粒度分布 (质量分数：%)

<0.5mm	0.5~3mm	3~10mm	10~15mm
1.6	31.2	26.5	17.3
15~20mm	20~25mm	>25mm	
8.4	5.9	9.1	

$$\text{所以 } f = \begin{bmatrix} 9.1 \\ 5.9 \\ 8.4 \\ 17.3 \\ 26.5 \\ 31.2 \\ 1.6 \end{bmatrix} \times \frac{1}{100}.$$

将 M 、 C 、 f 值代入式 (4-29) 可得：

$$f^*_{\text{C}} = q_{\text{C}} f_{\text{C}} = (I - MC)^{-1} f$$

$$\begin{aligned}
 &= \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & \\ & & 1 & & & & & \\ & & & 1 & & & & \\ & & & & 1 & & & \\ & & & & & 1 & & \\ & & & & & & 1 & \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.28 & 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.19 & 0.41 & 0.32 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.04 & 0.14 & 0.27 & 0.48 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.13 & 0.05 & 0.15 & 0.31 & 0.62 & 0 & 0 & 0 \\ 0.09 & 0.08 & 0.10 & 0.06 & 0.32 & 0.59 & 0 & 0 \\ 0.02 & 0.06 & 0.16 & 0.15 & 0.06 & 0.41 & 0.20 & 0 \end{bmatrix}^{-1} f \\
 &= \begin{bmatrix} 0.75 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.28 & 0.75 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.19 & -0.41 & 0.68 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.04 & -0.14 & -0.27 & 0.52 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.13 & -0.05 & -0.15 & -0.31 & 0.38 & 0 & 0 & 0 \\ -0.09 & -0.08 & -0.10 & -0.06 & -0.32 & 0.41 & 0 & 0 \\ -0.02 & -0.06 & -0.16 & -0.15 & -0.06 & -0.41 & 0.80 & 0 \end{bmatrix} f \\
 &= \begin{bmatrix} 1.33 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.50 & 1.33 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.80 & 1.47 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.59 & 0.78 & 0.76 & 1.92 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.27 & 1.13 & 1.20 & 1.57 & 2.63 & 0 & 0 & 0 \\ 1.63 & 1.45 & 1.41 & 1.51 & 2.05 & 2.44 & 0 & 0 \\ 1.24 & 1.23 & 1.25 & 1.25 & 1.25 & 1.25 & 1.25 & 1.25 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 9.1 \\ 5.9 \\ 8.4 \\ 17.3 \\ 26.5 \\ 31.2 \\ 1.6 \end{bmatrix} \times \frac{1}{100} \\
 &= \begin{bmatrix} 12.13 \\ 12.40 \\ 23.22 \\ 49.60 \\ 125.14 \\ 191.77 \\ 124.85 \end{bmatrix} \times \frac{1}{100}
 \end{aligned}$$

根据式 (4-35) 可得:

$$q_c = \sum_{i=1}^n q_{ci} f_{ci} = \sum_{i=1}^n f^*_{ci}$$

$$= (12.13 + 12.4 + 23.22 + 49.6 + 125.14 + 191.77 + 124.85) \times \frac{1}{100}$$

$$= 5.35$$

将上值代入式 (4-28):

$$q_R + q_P = q_C$$

$$q_R = q_C - q_P = 5.35 - 1 = 4.35$$

根据式 (4-36) 可得:

$$f_C = \frac{f^* c}{q_C} = \begin{bmatrix} 12.13 \\ 12.40 \\ 23.22 \\ 49.60 \\ 125.14 \\ 191.77 \\ 124.85 \end{bmatrix} \times \frac{1}{100} + 5.35 = \begin{bmatrix} 2.25 \\ 2.30 \\ 4.31 \\ 9.20 \\ 23.22 \\ 35.58 \\ 23.16 \end{bmatrix} \times \frac{1}{100}$$

$$\text{则 } Q_P = \frac{Q_R}{q_R} = \frac{700}{4.35} = 160.9 \text{ t/h.}$$

入球磨机之前, 被 V 型选粉机选出的细粉先经过收尘收走 5%, 然后再混合总量的 10% 的粉煤灰, 用 $Q_{\text{煤}}$ 表示所混合的粉煤灰, 则

$$\frac{Q_{\text{煤}} \times 100\%}{\left[\frac{Q_P}{95\%} + Q_{\text{煤}} \right]} = 10\%$$

$$Q_{\text{煤}} \times 100\% = \frac{Q_P \times 10\%}{95\%} + Q_{\text{煤}} \times 10\%$$

$$0.9Q_{\text{煤}} = \frac{160.9 \times 10}{95}$$

$$Q_{\text{煤}} = \frac{160.9 \times 10}{95 \times 0.9} = 18.8 \text{ t/h}$$

$$\text{系统产量 } Q = Q_P \times 95\% + Q_{\text{煤}} = 160.9 \times 95\% + 18.8 = 171.7 \text{ t/h.}$$

为简化计算, 系统电耗仅计磨机、辊压机、V 型选粉机, 其它辅机的电机均不计。

所以计算出系统电耗

$$A = \frac{(\text{辊压机功率} + \text{V型选粉机功率})}{Q_p} + \frac{\text{球磨机功率}}{Q}$$

$$= \frac{(2240+185)}{160.9} + \frac{3550}{171.7} \approx 35.7 \text{ kwh/t}$$

粉磨过程中的单位能耗可用下列公式表示：

$$W = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)$$

式中，P——为产品的 80% 能通过的方孔筛孔宽度，单位为微米；

F——为给料的 80% 能通过的方孔筛孔宽度，单位为微米；

W_i ——为邦德功指数，其大小可依据下式计算：

$$W_i = \frac{435}{(\text{Hardgrove 指数})^{0.91}}$$

对于不同物料，Hardgrove 指数可通过实验测定，回转窑熟料测定的 Hardgrove 指数为 50.57，计算得

$$W_i = \frac{435}{50.57^{0.91}} = 12.24$$

$$\text{所以 } W = 10 \times 12.24 \times \left(\frac{1}{\sqrt{80}} - \frac{1}{\sqrt{25 \times 10^3}} \right) \approx 12.9 \text{ kwh/t.}$$

由此可以算出系统的能量利用率：

$$\eta = \frac{W}{A} = \left(\frac{12.9}{35.7} \right) \times 100\% = 36.1\%.$$

如果该系统采用功率为 100kw 的 SF 系列打散分级机分选出小于 3mm 的细粉，根据 f_c 中的粒度分布质量分数，打散分级机分选出的物料流量

$$Q'_p = Q_p \times \frac{35.58}{23.16} = 1.54 Q_p.$$

利用浙江大学王仁东教授于 20 世纪 50 年代提出的公式：

$$Q \propto 1/d_a^\chi,$$

式中，Q——为磨机产量，t/h；

d_a ——为入磨物料粒径，mm；

χ ——为与物料性质及工艺流程有关的指数，开流水泥磨取 0.15。

用 Q'_M 表示采用打散分级机的系统磨机产量，则

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{\frac{1}{0.5^{0.15}}}{\frac{1}{3^{0.15}}}$$

$$Q' = \frac{\frac{1}{0.5^{0.15}}}{\frac{1}{3^{0.15}}} \times Q = \frac{\frac{1}{0.5^{0.15}}}{\frac{1}{3^{0.15}}} \times 171.7 = 131.1 \text{ t/h}$$

则系统电耗

$$A' = \frac{(\text{辊压机功率} + \text{打散分级机功率})}{Q_p} + \frac{\text{球磨机功率}}{Q'}$$

$$= \frac{(2240+100)}{1.54Q_p} + \frac{3550}{131.1} = \frac{1526}{Q_p} + 27.1$$

而采用 V 型选粉机的原系统电耗表达式为

$$A = \frac{(\text{辊压机功率} + \text{V型选粉机功率})}{Q_p} + \frac{\text{球磨机功率}}{Q}$$

$$= \frac{2425}{Q_p} + 20.7$$

使用 Matlab 绘制出两个电耗方程的曲线图, 如图 5-2 所示, 图中横坐标为分级设备选出的小于 0.5mm 的细粉流量 Q_p (亦即系统产量), 单位为 t/h; 纵坐标为系统电耗, kwh/t; 曲线 I 表示采用 V 型选粉机的系统电耗 A, 曲线 II 表示采用打散分级机的系统电耗 A' 。

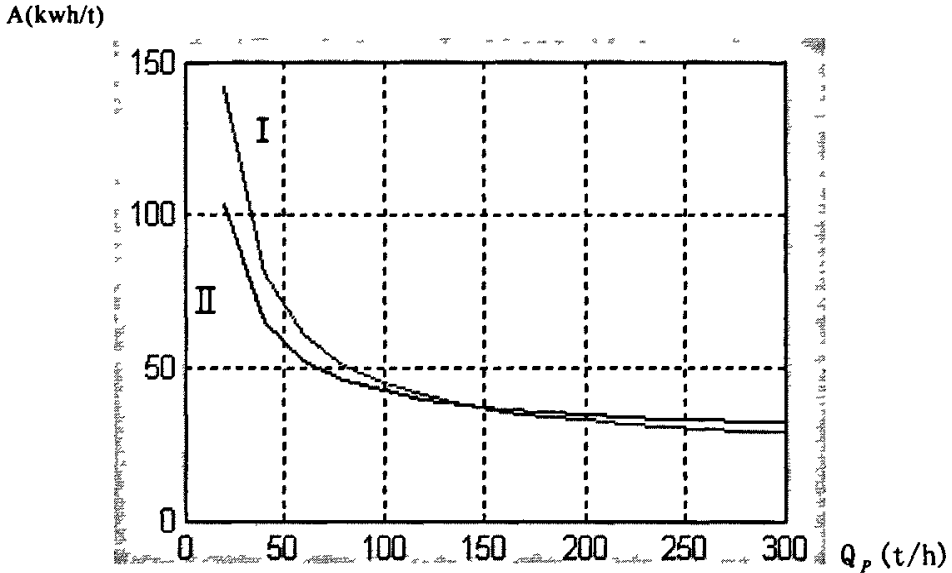


图 5-2 采用 V 型选粉机和打散分级机两种分级设备的电耗曲线

5.3 系统分析结论

综上所述，可以得出以下几个结论：

(1) 根据不同的系统物料平衡关系图，用同样的分析方法，也可得到其他系统的稳态模型，此模型可以成为粉磨系统的一种通用模型，作为实际生产中投料的一个依据；

(2) 从图上可以看出，曲线 I 在系统产量 Q_p 约为 150t/h 处开始趋于平稳，小于 150t/h 的范围内坡度较大，曲线 II 约在 125t/h 处趋于平稳。在本系统中，当系统产量约为 150t/h 左右时，采用两种分级设备所消耗的电耗相差很小，小于 150t/h 时采用打散分级机较为经济，而大于 150t/h 时则采用 V 型选粉机较为经济。在呼市水泥分厂采用的系统中， Q_p 达到了 160.9t/h，所以从电耗方面考虑，选择 V 型选粉机是合适的；

(3) V 型选粉机前置，入辊压机的物料中细粉量减少，并且使得物料在挤压之前经过 V 型选粉机和称重料仓两次混合，物料均匀度增强，辊压机的预粉磨效果更显著；但是，相比 V 型选粉机后置，由于粗颗粒的大量存在，加剧了 V 型选粉机的磨损。从其他的工程实践来看，本人认为，V 型选粉机前置或后置对电耗没有明显的影响。所以，在实际生产中，厂

家应该根据自身情况，选择合适的设备与系统；

(4) 对于已经配套好的系统，即辊压机、分级机、球磨机选定后，只能分析从 V 型分级机用风拉出来的最佳粒径范围（根据系统电耗）。如分出来的量小，则半成品的粒度小，分级机用风量小，分级电耗低，但系统输送及球磨机分摊到每吨产量的电耗高；反之，则半成品的粒度大，分级机用风量大，系统和风机的磨损大，分级电耗高，但系统输送及球磨机分摊到每吨产量的电耗低；

(5) 对于大辊压机配小球磨机（球磨机的装机功率：辊压机的装机功率 ≤ 2.5 ），如冀东的系统（球磨机为 3550kW，辊压机为 2240kW，比值为 1.5），肯定是用 V 型选粉机作为分级设备。就其自身相比，系统产量在 150~190t/h，属于比较好的运行范围，这样，半成品粒度在 0.5~0.8mm 之内，保证分选系统，包括风机的磨损在可以接受的范围，系统产量较高，电耗较低；

(6) 对于小辊压机配大球磨机（球磨机的装机功率：辊压机的装机功率 ≥ 2.5 ），如中联鲁宏菏泽水泥有限公司（球磨机为 3550kW，辊压机为 1000kW，比值为 3.55），系统用打散分级机，要分太细的半成品，分级精度不高，影响系统产量，电耗会增加；太粗的半成品，球磨机磨不细，辊压机功能发挥不够，系统电耗也不会低。系统产量可能在 125~150t/h 范围内合适。

5.4 粉碎函数 M 的优化问题讨论

在系统的稳态模型中，粉碎函数 M 起着极其中重要的作用，要使 M 最优化，辊压机必须处于最佳的工作状态，除了适宜的喂料粒度、合适的压力、物料循环量、辊缝及小仓料位等等参数外，对于辊压机本身的运转方面，还必须注意以下几个方面：

5.4.1 辊压机辊面问题对粉碎函数 M 的影响

辊压机在生产运转过程中，辊面的损坏是一种较常见的现象，其主要表现为辊面产生裂纹，扩展为裂缝，导致辊面硬质耐磨层的剥落。当辊面完好时，料子会受到充分挤压，形成的料饼量多，此时的预粉磨效果非常

好。辊面磨损后，辊缝变大，通过辊压机的物料流量变大，且由于辊子表面凹凸不平，料子受到的挤压力变小，使料饼量减少，料饼厚度大且疏松，颗粒料多，预粉磨效果变差。这样，就会使得某一粒级被粉碎进入下一粒级的比例减小，导致 M 矩阵中每一列除第一个非零元素以外的其他元素值减小，最终使能耗偏大。

一、辊面磨损的原因

(1) 辊面的材质，特别是耐磨层的材质性能非常重要。耐磨层性能差，则磨损快，使用时间短，预粉磨效果就差。

(2) 物料的易磨性。物料一般由熟料、混合材（火山灰+石灰石）、石膏组成。众所周知，熟料的易磨性同原料和煅烧情况有关， C_3S 和 C_3A 较易磨， C_2S 和 C_4AF 较难磨，过烧料、黄心料、飞砂料较难磨，熟料温度高时其易磨性也差。当粉磨易磨性差的物料时，辊压机的辊面磨损就快（2001 年热工标定时，入辊压机物料粉磨功指数为 14.5 kWh/t ）。

(3) 物料粒度。物料粒度过大会加剧辊面的磨损，熟料和石膏的粒度控制都比较好，但石灰石由矿山小破碎机破碎供给，粒度控制不严，特别是破碎机磨损后，石灰石的粒度偏大（最大达 100 mm ），加大了辊面的磨损，缩短了辊面的寿命。

(4) 金属硬物进入辊压机。由于在运行过程中，喂入辊压机的物料中混入了金属杂物，在两个辊子间强大的压力作用下，金属杂物就有可能直接破坏辊面，使辊面产生凹坑或硬质耐磨层崩落。如果情况严重，将直接影响辊面寿命，缺陷增多，还会影响辊压机产生的料饼质量而达不到预期的辊压效果。

二、减少辊面磨损的措施

(1) 辊面尽量采用新型耐磨材料，以保证其耐磨性能；运转时，随时查看辊面磨损情况，在磨损量较小时就应停机补焊。

(2) 加强生料配料和熟料煅烧操作，减少过烧料、黄心料、飞砂料等易磨性差的熟料，并强化熟料的冷却，降低熟料温度，提高熟料的易磨性。

(3) 加强物料粒度控制，控制石灰石粒度和物料粒度在 $10 \sim 40 \text{ mm}$ 之间。

(4) 确保除铁器、金属探测仪、三通阀的正常工作，以免金属硬物

进入辊压机。

5.4.2 辊压机冲料对粉碎函数 M 的影响

当辊压机发生冲料时，往往将入磨皮带压死，致使不能向磨机连续稳定地喂料，严重影响了磨机的正常运转，增加了能耗，同时也增大了工人的劳动强度和设备的维修量，影响了正常生产。磨机不能正常运转，会使粉碎函数 M 的值不稳定，偏离了“稳态”的范围，导致整个模型失去意义。

一、冲料的原因

1. 入辊压机物料的粒度

(1) 入辊压机的混合料中粉状物料较多喂入辊压机的物料主要是石膏、熟料、混合材以及辊压机自身部分循环料。辊压机自身循环的一部分物料是为了增加物料的密实度，自身循环的物料中粒径小于 2 mm 的物料量约占 80%~90%。当入辊压机的混合料中粒径小于 10 mm 的物料量占 70%以上，粉状物料较多时，压辊与物料之间的滑动现象急剧增加，难以形成有效的料床，料间粉碎现象消失，物料基本不受挤压而自由下落，难以形成料饼，辊压机失去了其挤压粉磨的意义，此时它只相当于一直通的溜管，导致冲料的发生。

(2) 入辊压机的混合料中夹杂有大块物料。当混合料中夹杂有粒径在 150 mm 以上大块物料时，瞬间强行撑开辊缝，系统卸压，辊缝瞬间变大，料床破坏，料间粉碎现象消失，造成冲料。

(3) 辊面沿长度方向上的粒度分布不均。辊面沿长度方向上的粒度分布相差太大，使辊面受力不均，辊缝偏差较大，系统卸压，料床破坏，料间粉碎现象消失，造成冲料。

2. 入辊压机物料的温度

辊压机的物料操作温度要求低于 80℃，由于生产需要，有时候熟料温度高达 120℃。这样的物料相对来说，粘性大，脆性差，而辊压机不宜粉磨粘湿性的塑性物料，因此当高温物料喂入辊压机时，压辊与物料之间相互咬合不良趋势增强，不能形成料床粒间粉碎，造成冲料。

3. 设备自身方面的原因

辊压机侧颊板的磨穿。在辊面沿长度方向的两端，有两块侧颊板，其主要作用就是防止辊压机在工作过程中，物料从压辊的两端逸出，发生离析现象。这两块侧颊板在物料的不断冲刷下严重磨损，一旦磨穿后，就失去了它应起的作用，使离析现象加剧，造成冲料也是必然的了。

二、防止冲料的措施

1. 入辊压机物料的粒度控制

(1) 严格控制入辊压机的混合料中粉状物料的比例。使入辊压机的混合料中粒径小于 10mm 的物料量小于 70%，保证正常的料床粒间破碎。

(2) 严格控制入辊压机的物料粒度。在上道工序中采取措施使粒度大于 150mm 的大块物料从系统中分出，避免进入辊压机，破坏正常的料床。

2. 入辊压机物料的温度保证

严格控制入辊压机的物料温度低于 80℃，当系统物料温度超过 80℃，在上道工序中采取降温措施，保证物料的脆性、可挤压性，使压辊与物料之间相互咬合的趋势增强，形成有效的料床粒间粉碎。

3. 设备自身方面原因的克服

定期检查侧颊板磨损情况，及时更换磨穿的辊压机侧颊板。

5.4.3 辊压机振动对粉碎函数 M 的影响

在正常工作情况下，由于进料量和物料粒度级配变化，辊压机活动辊动作而产生脉动，这是正常的工作振动。但是非正常的振动会影响辊压机稳定的工作状态，使得粉碎函数 M 的求解失真。

在辊压机粉磨系统设计时，值得注意的是皮带机的卸料点必须对准喂料小仓下料口的中心。如果偏移布置，卸到仓内物料会产生离析现象，即较大的颗粒会向单侧积聚，当喂入辊压机后使一侧辊缝变大，活动辊位移频繁，使得辊压机产生剧振；辊压机的另一振动原因，是特定的传动系统带来的。洪堡公司的 X 型辊压机传动系统有其独特之处，就是把电机背在行星减速机身上，这样结构上很紧凑，占地少，上艺布置方便。但是如果采用这种方式，使用国产电机或行星减速机就会出现洪堡公司未曾预料的情况。洪堡原设计中采用了西门子公司的电机，同样传动功率的西门子电

机比国产电机体积小而重量轻且运转平稳；由于国产电机大而重，且运转不如西门子公司电机平稳，采用多根三角皮带带动行星减速机，整个传动装置重心向外偏移，因此振动比原设计要大。

辊压机一般布置在地面上为佳，但是由于工艺流程的需要，有可能放置在楼面上或钢结构平台上。故在设计楼面和钢结构平台时，应充分考虑辊压机的工作载荷系数，若楼面无加强梁，设计单薄，平台刚性太差，也会引起辊压机的剧烈振动，必将产生严重后果。辊压机的振动加剧，使得辊子工作负荷增大，使轴承的当量负荷成倍升高，而最终导致轴承损坏，在国内外辊压机用户中这样的事例并非偶见。为了尽量减小辊压机的振动，除了辊压机的自身结构和液压系统及传动型式的设计之外，工艺布置和操作也应严格按各自的辊压机的技术要求执行，控制进料粒度，在进料装置上方形成稳定的料柱，均匀地进料使得辊压机较平稳地运转。

第 6 章 结论及有关问题的讨论

6.1 结论

综合上述各章节的分析、讨论，可以得到如下结论：

1. 大量生产实践表明，通过辊压机对颗粒较粗的熟料和易磨性较差的矿渣先行破碎，磨机台时产量能够很容易地提高 30%~40% 左右，确实是一条大幅度提高主机台时产量、降低产品单耗的有效途径。但这其中必须包含一个“工艺合理”的前提，系统中一旦存在设计缺陷，它对生产的影响往往是致命的。

2. 挤压联合粉磨新工艺技术为水泥厂粉磨系统的改造提供了节能高效、运行可靠的新型粉磨技术及装备，无论在节能增产效果还是在设备选型规格上，联合粉磨流程都具有更完善的综合优势。只要我们深入了解并掌握辊压机的工作原理和性能特征，就能使水泥粉磨进一步节能降耗，并创造出更大的经济和社会效益，值得在以后的工程设计和生产改造中大力推广和应用。

3. 数学模型研究是过程分析和优化研究的基础。本模型的目标是在给定系统新给矿的流量及其粒度组成、给定粉碎及分级设备工作参数的条件下，应用粉碎作业模型来定量描述粉碎前后物料粒度组成的变化以及应用分级作业模型来定量描述物料中各粒级经过分级后的走向分配情况，并在此基础上通过物料平衡原理计算回路中所有物料流的流量及其粒度组成。这里的物料平衡包括固体物料总量的平衡以及每个粒级物料量的平衡。然后利用模型所得到的结果对实际生产系统进行能耗分析。

4. 以内蒙古冀东水泥有限责任公司呼市水泥分厂的工程实践为例，利用模型进行分析，得出的分析结果与实际生产情况基本吻合。本人认为，对该模型在精确度和简洁度上再深入研究，必将对生产实践带来积极的指导作用。

6.2 有关问题的讨论

围绕粉磨过程的能耗问题，多年来人们做了大量的工作，这包括粉碎机理解析、设备结构和材质改进、工艺参数最佳化及过程优化控制等。这些研究与描述粉磨过程和参数关系的数学模型密切相关，但是由于粉磨过程的复杂性和不同时期科学研究手段的局限，粉磨过程能耗模型和优化研究至今没有得到令人满意的结果。

本文所建立的稳态模型，关键在于确定参数，在特定的工作条件下，要确定粉碎矩阵 M 和分级矩阵 C 并不困难。但是，考虑到模型的通用性，怎样找到适应任何系统的 M 和 C 的精确、快速的求解办法，怎样使模型一步到位，直接计算出系统能耗，仍需进行大量的研究工作来完成。

参考文献

- [1] 张艳英. 辊压机在粉磨工艺中的应用. 中国建材装备, 2001. 5: 6~7
- [2] 王仲春, 曾荣. 料床粉磨技术的进展. 水泥 CEMENT, 2005. 6: 9~13
- [3] 张日华, 颜淮祥, 曹良奎. 高性能水泥磨机的开发. 矿山机械, 2005. 33(7): 33~35
- [4] 聂鸿丽, 罗帆粉. 磨功指数试验应注意的几个问题. 水泥生产手册丛书(之九), 1986
- [5] 朱衡君主编. MATLAB 语言及实践教程. 北京: 清华大学出版社; 北京交通大学出版社, 2004. 10
- [6] 成立、王善拔等. $\Phi 2.2\text{m} \times 6.5\text{m}$ 球磨机的技术改造. 工艺装备, 2004, 5: 40~47
- [7] 王晓丹等编著. 基于 MATLAB 的系统分析与设计: 图像处理. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000. 9
- [8] 黄之初等编著. 建材工业设备管理工程. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1996. 11
- [9] 姚安佑, 张飞猛, 王建中编著. 机电一体化技术及应用. 武汉: 武汉工业大学出版社. 1996. 5
- [10] 陶珍东, 郑少华主编. 粉体工程与设备. 北京: 化学工业出版社, 2003. 7
- [11] 陆厚根编著. 粉体技术导论. 上海: 同济大学出版社, 1998. 3
- [12] 黄有丰, 汪澜, 顾正义编著. 水泥工业新型挤压粉磨技术. 北京: 中国建材工业出版社, 1995. 9
- [13] 方景光. 粉磨工艺及设备. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2002. 8
- [14] 刘建寿, 赵红霞等. 水泥生产粉碎过程设备. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005. 6
- [15] 戴少生, 廖中同等. 粉碎工程及设备. 北京: 中国建材工业出版社, 1994. 11
- [16] 胡宏泰等. 水泥的制造和应用. 山东: 山东科学技术出版社, 1994. 3
- [17] 张浩楠. 中国现代水泥技术及装备. 天津: 天津科学技术出版社, 1991
- [18] 王仲春, 曾荣. 加速水泥和高细矿渣立磨国产化开发. 中国水泥, 2003. 11
- [19] 张超, 张永谋. 水泥粉磨系统技术措施及技术改造的优化. 新世纪水泥导报, 2002. 3: 32~35
- [20] 柯家春. 水泥磨系统的综合改造. 水泥工程, 1998. 1
- [21] 蒋冬青. 水泥磨系统的技术改造. 矿山机械, 2003. 1: 20~21
- [22] 冯建国. 带辊压机的水泥磨系统的调试与生产. 水泥工程, 2004. 4, : 32~34

- [23] 张起民, 张显铎. 料层挤压粉碎技术及装备的发展. 中国水泥, 2003. 3: 49~52
- [24] 石志明, 张军胜. 水泥磨的综合技改. 水泥技术, 2004. 3: 91~92
- [25] 韩仲琪. 大型节能水泥粉磨技术的发展. 中国粉体技术, 2000. 10: 49~52
- [26] 朱昆泉, 许林发. 建材机械工程手册. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2000
- [27] 王仲春. 水泥工业粉磨工艺技术. 北京: 中国建材工业出版社, 2000
- [28] 彭宝利. 水泥生产工艺流程及设备参考图册. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1998
- [29] 王君伟, 李祖尚. 水泥生产工艺计算手册. 北京: 中国建材工业出版社, 2001. 11
- [30] 聂鸿丽, 罗帆. 粉磨功指数试验应注意的几个问题. 水泥生产手册丛书(之九), 1986
- [31] 李坤山, 梁永绯、魏德钰. 关于入磨物料粒径最佳值的探讨. 济南大学学报(自然科学版), 2002. 16 (2): 205~211
- [32] 姜启源, 谢金星, 叶俊编. 数学模型. 北京: 高等教育出版社, 2003. 8
- [33] 刘秉正, 彭建华编著. 非线性动力学. 北京: 高等教育出版社, 2004
- [34] 吴成义, 张丽英编著. 粉体成形力学原理. 北京: 冶金工业出版社, 2003
- [35] 张森林. 建材机械与设备. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1991
- [36] 盖国胜. 超细粉碎分级技术 理论研究 工艺设计 生产应用. 北京: 北京出版社, 2000
- [37] Kewei;Nan,Junma;He,Lin.Monolayer diamond tools brazed with active filler. XiyouJinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Metal Materials and Engineering, v 33, n 7, July, 2004, p 771-774
- [38] Zhang,Ke;Wu,Yu-Hou;Zhang,Li-Xiu. Study on performance of ceramic betarings electric spindle units at high-speed.Shenyang. Jianzhu Daxue Xuebao (Ziran KexueBan)/Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), v 21, n 4, July,2005, p 407-411
- [39] Veit,Peter. Integrated track maintenance integrierte gleisinstandhaltung. ZEV Rail Glasers Annalen,v 129, n 8, August, 2005, p 330-335
- [40] Kis,P.B.;Mihalyko,Cs.;Lakatos,B.G.. Comparison of two discrete models for closed continuous grinding. CHISA 2004 - 16th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2004 - 16th International Congress of Chemical and Process Engineering, 2004, p 3627-3633

- [41] Kondoh,Katsuyoshi..High strength wrought magnesium alloy by employing grain-refined powder. Magnesium Technology, Magnesium Technology 2005 - Proc. of the Symp. sponsored by the Magnesium Committee of the Light Metals Division (LMD) of TMS (the Minerals, Metals and Materials Soc.) with the Int. Magnesium Assoc., 2005, p 77-80
- [42] X.J.;Zou,X.W.;Ciang,Z.C..Substrate materials for poly-CSiTF solar cells: optimization of silicon sheet from powder.Acta Metallurgica Sinica (English Letters), v 18, n 3, June, 2005, p 184-188
- [43]Shin,Ho-Jung;Lee,Go-Gi;Kang,Sin-Myoung;Kim,Seon-Hyo;Choi,Wung-Yuel;Park, Jang-Hum; Thomas, Brian G.. Effect of mold oscillation on powder consumption and hook formation in ultralow-carbon steel slabs. Iron and Steel Technology, v 2, n 9, September, 2005, p 56-69
- [44] Zhang,H.;Ai,H.;Wang,G.;Xu,J.. Research and implementation for intelligent plasma powder deposition manufacturing based on ANN-ES. ICMA 2004 - Proceedings of the International Conference on Manufacturing Automation: Advanced Design and Manufacturing in Global Competition, ICMA 2004 - Proceedings of the International Conference on Manufacturing Automation: Advanced Design and Manufacturing in Global Competition, 2004, p 451-458
- [45] Yan, Qiusheng; Syoji, k; Tanaka, k. Studies on face gringding process of metal layer bond wrapped monorail grit cup CBN quill. Jixie Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Mechanical Engineering, v 41, n 8, August, 2005, p 208-212
- [46] Dare,Kevin. Grinding superflat - The options. Concrete (London), v 39, n 9, September, 2005, p 28-30
- [47] Dave,Kevin. Keeping your cool with cryogenic grinding. Powder and Bulk Engineering, v 19, n 6, June, 2005, p 23-25
- [48] Koyanaka,Shiqeki;Endoh,Shiqehisa;Matsuda,Satoru.Advanced.impact-grinding system for the recycling of scrap electronics. CHISA 2004 - 16th International Congress of Chemical and Process Engineering, 2004, p 1695-1703
- [49] Olejnik, T.P.; Heim,A.; Pawlak,A.. Effect of the number of grinding media contact points on ceramic body grinding rate. CHISA 2004 - 16th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2004 - 16th International Congress of Chemical and Process Engineering, 2004, p 1123-1135

- [50] Xing,Tie-Liang;Ge,Xiao-Ling;Zhang,Yuan. Study on the experiment of extracting osmanthus essence by superfine comminution. Huadong Ligong Daxue Xuebao /Journal of East China University of Science and Technology, v 31, n 4, August, 2005, p 550-552
- [51] Dong-Xing,Wang;Dong-Ming,Guo;Zhen-Yuan,Jia;Lian-Hui,Jiang.Thickening the colored regions in a color volume dataset. Computers and Graphics (Pergamon), v 29, n 4, August, 2005, p 588-593
- [52] Montes,J.M.;Cuevas,F.G.;Cintas,J.;Gallardo,J.M.. Effective stress during biaxial compression of powder aggregates. Materials Science and Technology, v 21, n 8, August, 2005, p 917-920
- [52] Zhang,Weijia;Wang,Tianmin;Mi,Bi;Hong,Ke. Technological development of preparing nanosized ITO powder and ultra high density ITO target. Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Metal Materials and Engineering, v 33, n 5, May, 2004, p X-453

致 谢

本文是在导师黄之初教授和包玮教授的悉心指导下完成的。黄老师和包老师对我在攻读硕士学位期间的学习和工作给予了大量的关怀和教诲，论文的每一部分，都凝聚着他们的心血。两位老师高瞻远瞩的科学眼光、广博的知识、开拓进取的精神和宽广的胸襟给我留下了深刻的印象，并将使我终生受益，激励我奋发向上。黄老师和包老师治学的严谨和身体力行的工作作风，都深深的影响着我。两年多的生活，两位老师和师母给予了我父母般的挚爱，使我得到了无微不至的关怀和教导，他们的关切令我永生难忘。

在发表论文和毕业论文工作过程中，还得到了合肥水泥工业研究设计院的大力支持和帮助；还有张柱银等老师的帮助，其中也凝聚了他们的宝贵建议和期望。同时唐建辉、黄骞、刘海燕、王欢、王小明以及我的室友给予我生活和学习上很多的帮助，在此表示衷心的感谢。

我深深的体会到高等院校和大型研究院联合培养研究生对学习所带来的好处，能够为学生提供良好的实践条件，让理论与实践联系更加紧密。

最后衷心感谢多年来为我的学习和生活付出了太多心血的父母亲和其他亲人，是他们的关怀、支持和无私奉献才使我顺利完成了学业，我将以更加积极向上的态度去努力学习、工作和生活。

附 录

攻读学位期间发表的学术论文

1. 王学清, 包玮, 黄之初. 高掺量矿渣水泥粉磨节能的新工艺探索, 新世纪水泥导报, 2006 年第 6 期 (已录用)

攻读学位期间参与的科研项目与工程实践

1. 参与国家高技术研究发展计划 (863 计划) 引导项目“大型辊压机节能粉磨技术及装备的开发”, 主要负责带 V 型选粉机的辊压机联合粉磨系统的能耗分析, 毕业论文亦以此为中心;
2. 参与江苏科行环境工程技术有限公司“冶金废渣无害化与资源化处理的共性技术与关键装备产业化”项目申报材料的修改;
3. 到安徽阜阳粉磨站与合肥水泥工业研究设计院的工程师一起参与设备调试工作;
4. 到内蒙古冀东水泥有限责任公司呼市水泥分厂与合肥水泥工业研究设计院的工程师一起参与设备调试工作。