



现代水泥工业中高效节能的粉磨技术

赵计辉, 王栋民, 王学光

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要:从粉磨系统与设备、高性能助磨剂和高效粉磨技术的选用等方面阐述现代水泥工业高效节能粉磨技术的最新进展, 指出采用优化改进现有粉磨系统(如新增预粉磨或细破碎、开路改闭路、选用高效选粉机等)、选用新型粉磨设备(如辊压机、立磨和筒辊磨等)及其多种粉磨设备的组合系统、合理使用高性能水泥助磨剂、从技术和经济角度选择最适宜的粉磨技术等措施, 是当今水泥工业节能降耗、优质高产的关键技术途径, 可实现显著的经济效益和社会效益。

关键词:水泥工业; 粉磨技术; 粉磨设备; 助磨剂; 节能降耗

中图分类号: TQ172.63

文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2013)04-0065-07

Progress in Grinding Technology of High-efficient Energy Conservation in Modern Cement Industry

ZHAO Jihui, WANG Dongmin, WANG Xueguang

(School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The progress in new grinding technology used in modern cement industry to realize high-efficient energy saving was reviewed from the aspects of the grinding system and equipment of high-efficient energy conservation, usage of high performance grinding aids and selection of efficient grinding technology. It is suggested that the optimization of existing grinding system (such as adding pre-grinding or fine crushing, changing open system to closed system, selecting high efficiency separator etc.), selection of new cement equipment (such as rolling mill, vertical mill and roller mill) and combined system with different grinding equipment, rational use of high performance grinding aids and the choice of the most suitable grinding technology from technical and economic angles are the key techniques of energy saving and consumption reducing in nowadays cement industry, which can achieved significant economic and social benefit.

Key words: cement industry; grinding technology; grinding equipment; cement grinding aids; energy saving and consumption reducing

收稿日期: 2013-01-28, 修回日期: 2013-02-21。

基金项目: 中央高校基本科研业务费基金项目, 编号: 2009KH09。

第一作者简介: 赵计辉(1985—), 男, 博士研究生, 研究方向为建筑材料及水泥混凝土外加剂。电话: 15901245174, E-mail: zhaojihui324@163.com。

通信作者简介: 王栋民(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为材料的精细化工合成、化学外加剂和现代水泥混凝土材料、工业或工业固体废物处理与生态建筑材料制备。E-mail: wangdongmin-2008@163.com。

水泥生产工艺可概括为“两磨一烧”, 即生料粉磨、熟料煅烧和水泥终粉磨。其中, 水泥粉磨工序不仅能耗很高(粉磨电耗约占水泥总电耗的 70%), 而且能量利用率极低, 大部分能量(约 97%)转变为热能而浪费掉, 只有极少部分用于增大物料的比表面积^[1], 因此节能、降耗、减排成为当前水泥技术的重要课题。水泥技术尤其粉磨技术取得了快速发展, 如水泥粉磨设备从单一球磨机发展为辊压机、立磨、高细磨及其各种磨组成的联合粉磨等先进设备和系统, 以及高效选粉机、高性能水泥助磨剂等粉磨节能技术在水泥粉磨中的应用^[2-5]。这些都是水泥工业中节能技术在粉磨工艺中的表现, 促进了水泥工业的节能降耗。本文中结合水泥工业粉磨过程的特点, 主要阐述新型高效节能粉磨技术的成果, 探讨实现水泥粉磨工艺高效节能的技术手段和方向。

1 高效节能粉磨系统与设备进展

1.1 球磨机粉磨系统

长期以来, 球磨机在水泥粉磨系统中一直占有主导地位, 它几乎与水泥工业一样历史悠久。尽管球磨机目前仍然广泛应用于水泥工业中, 但是随着新型粉磨设备的不断开发, 球磨机的能量利用率很低(一般小于 3%)、单位电耗较高等局限性变得非常明显。另外, 近些年球磨机粉磨系统也在不断地改进, 即开路粉磨系统(见图 1)—闭路粉磨系统(见图 2)—磨外预粉磨系统(见图 3)—分别粉磨系统(见图 4)—高细高产磨或挤压联合高细粉磨系统(见图 5)。其中, 1) 开路粉磨由于缺点明显, 已逐渐被淘汰。2) 闭路系统在水泥生产应用较多, 但是简单的闭路系统目前也逐渐被淘汰。3) 磨外预粉磨是开路和闭路系统中应用较多

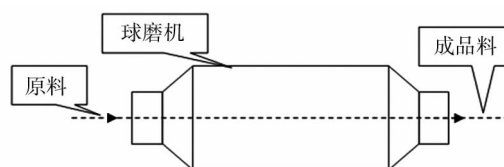


图 1 开路粉磨系统

Fig. 1 Grinding system of open circuit

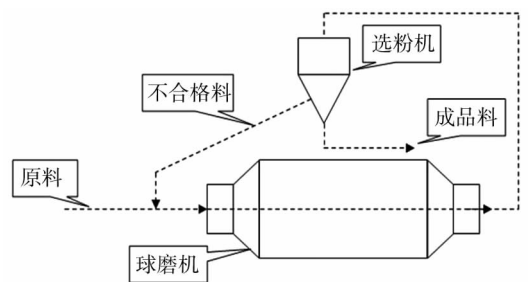
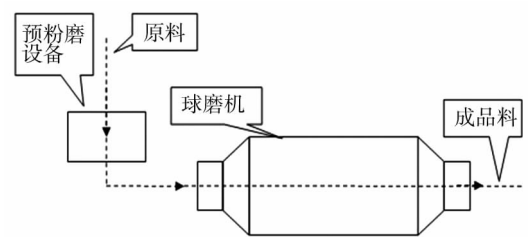
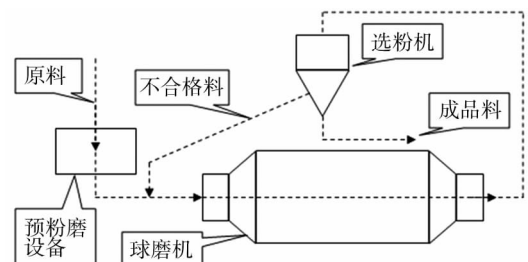


图 2 闭路粉磨系统

Fig. 2 Grinding system of closed circuit



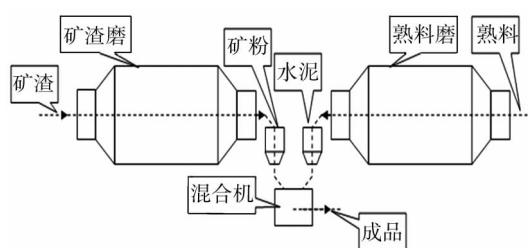
(a) 开路式



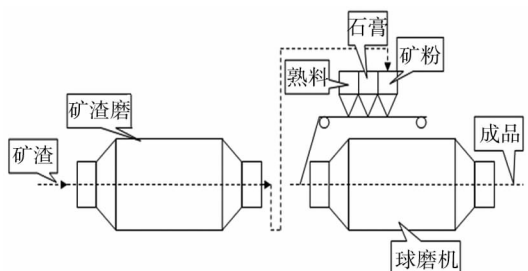
(b) 闭路式

图 3 磨外预粉磨系统

Fig. 3 Pre-grinding system of open and closed circuit



(a) 并联式

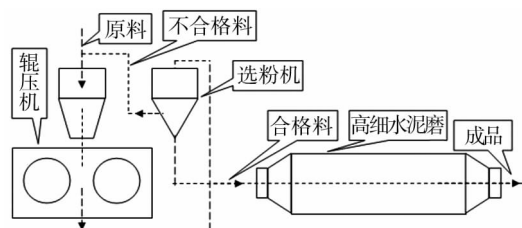


(b) 串联式

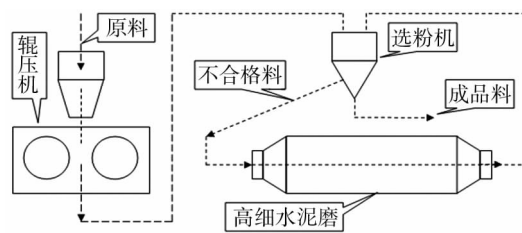
图 4 分别粉磨系统

Fig. 4 Separate grinding system

的工艺,磨外预粉磨是在水泥物料入磨前将其进行破碎粉磨,使入磨物料的粒度大幅减小,进而使物料在磨内得到充分研磨,粉磨加快,提高了粉磨效率,实现



(a) 开路式



(b) 闭路式

图 5 挤压联合高细粉磨系统

Fig. 5 High-fine yield union grinding system

增产节能。4) 分别粉磨系统是目前对粉磨熟料与矿渣等较难磨物料的常用工艺,减轻了由于 2 种或几种物料易磨性相差悬殊而对粉磨效率的影响,充分发挥了磨机对物料的粉磨作用,提高综合粉磨效率。5) 高细高产磨是针对普通球磨机进行内部结构改造,并采用微型研磨体实施粉磨的一项新型粉磨技术,主要通过衬板、隔仓板、篦板等改造,起到将大颗粒消除在球仓,以拦截其进入下一仓的作用,既可采用开路,也可采用闭路,组成高细高产磨或挤压联合高细粉磨系统,其节能增产效果更加突出,具有产量高、电耗低、细度好等特点,其中增产率普遍达到 35% 以上,节电 30% 以上,国内目前已广泛采用这种新工艺^[6-7]。

1.2 辊压机系统

辊压机又称挤压磨、辊压磨,是 20 世纪 80 年代中期开发的新型水泥粉磨设备,既可用于生料粉磨,也可用于水泥粉磨过程。由于辊压机的粉磨效率高,且应用范围广,尤其在生料和球磨机预粉磨系统的效果显著,因此成为一种新型节能粉磨设备,发展很迅速。辊压机由 2 个相向旋转的磨辊组成,其中 1 个为固定辊,另 1 个为活动辊(可水平移动),工作原理(见图 6)如下:物料从上方加料装置均匀喂入,在重力和相对旋转磨辊的作用下,物料被带入 2 个辊之间形成的粉碎腔,受到强大的挤压力,随着物料的下沉,挤压强度越来越大,直至最大值,物料被挤压成料饼状(物料颗粒被粉碎或出现微裂纹)而卸出^[8-9]。

辊压机在粉磨系统中一般采用基于料层粉磨技术的辊压机及配套的集打散、分级、烘干于一体的选粉机,可与球磨机配合或自成系统组成各种各样的工艺流程。目前,带有辊压机常用的粉磨系统如下^[10-11]:

- 1) 辊压机半终粉磨系统:物料通过辊压机—打散分级

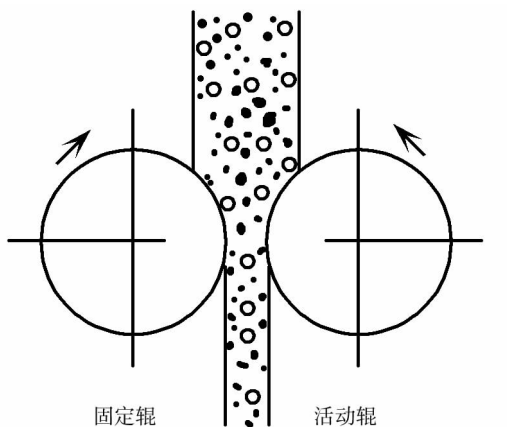


图 6 辊压机工作原理

Fig. 6 Schematic illustration of roller press

机—球磨机—选粉机完成作业。另外,生产实践中,当挤压成品量较高时,较多采用辊压机—打散分级机—选粉机—球磨机这种半终粉磨系统,优点是减轻球磨机的负担,提高效率并更有利于控制物料的筛余或颗粒级配。2)挤压联合粉磨系统:如图 5 所示,挤压联合粉磨中辊压机为闭路,大量细粉对水泥粉磨有利,并保证入磨物料粒度均匀。3)挤压预破碎—粉磨系统:物料经过辊压机—球磨机—选粉机进行粉磨、分级,主要作用为降低球磨机的入磨粒度,但节能增产效果有限。4)终粉磨系统:物料通过辊压机—打散机—选粉机完成作业,取消球磨机。

对于生料粉磨,采用半终粉磨先选出合格成品更有利,其次为联合粉磨,最后为预粉磨工艺。按实践经验,在同为高效选粉机的生料挤压系统情况下,应用半终粉磨可比原球磨系统增产约 100%~150%,联合粉磨增产约 80%,预粉磨工艺只增产 30%~40%。目前,水泥生料和终粉磨中辊压机所采用的系统主要以半终粉磨和联合粉磨系统为主,节电 25%~30%^[6]。由于采用辊压机终粉磨水泥时,一般水泥颗粒粒径分布较窄,和易性不好,标准稠度用水量较大,故目前终粉磨系统的实际应用较少^[12]。

1.3 立式粉磨系统

立式磨又称碾压机,最初于 20 世纪 20 年代应用在水泥工业的煤粉制备,经过技术的不断发展和成熟,已在水泥生料粉磨和矿渣粉磨中应用广泛^[13]。立式磨是根据料床粉碎原理,通过磨辊与磨盘的相对运动将物料粉碎(见图 7),并由热风将磨细的物料烘干、带起,再由分级装置在磨内分级,粗粉落入磨盘重新被粉碎,成品利用气流送出磨外由袋收尘器收集^[14]。立磨集细碎、烘干、粉磨、选粉、输送于一体,克服了球磨机粉磨的诸多缺陷,具有粉磨效率高、能耗低的优点。

立磨已越来越广泛地用于水泥生产,在现代新建的水泥生产线中,粉磨煤、水泥生料采用立磨者占 90%以上,近年来 50%以上的水泥熟料和矿渣粉磨采

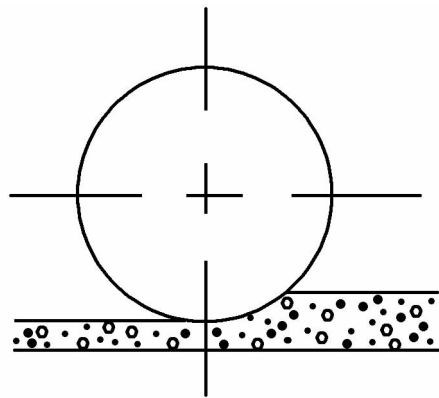


图 7 立磨的挤压物料示意图

Fig. 7 Extrusion illustration of vertical mill

用立磨,因此,立磨系统将是现代水泥粉磨工艺系统的重要组成部分。它具有如下一系列优良特性:粉磨效率高,粉磨能耗低,系统单位电耗比球磨节省 10%~20%;通风烘干能力强,充分利用窑尾废气在磨内烘干生料的水分高达 20%;放宽了物料入磨粒度;物料在磨内停留时间缩短,对物料配比或细度变化的响应迅速,且过粉磨现象少;对物料适应性强;适应水泥装备大型化;噪音比球磨小很多等^[15-16]。

目前使用的立磨主要有 LM 磨(德国莱歇公司)、MPS 磨(德国非凡兄弟公司)、RM 磨(德国伯力鸠斯公司)、MBF 磨(美国福斯特惠勒公司)、ATOX 磨(丹麦史密斯公司)、FM 磨(日本神户制钢所)、UM 磨(日本宇部株式会社)等^[15]。在水泥终粉磨方面,虽然球磨机在我国仍处于选用率的高位,但是立磨在生料粉磨上取得的成功,促进了立磨应用于水泥终粉磨中的研究,这种趋势目前已开始显现,国内已有少数水泥生产厂家直接应用立磨系统进行水泥终粉磨,工艺流程见图 8。随着立磨制造与应用技术的逐步改进与完善,在水泥终粉磨中立磨同样也将会逐渐取代或部分取代球磨系统。

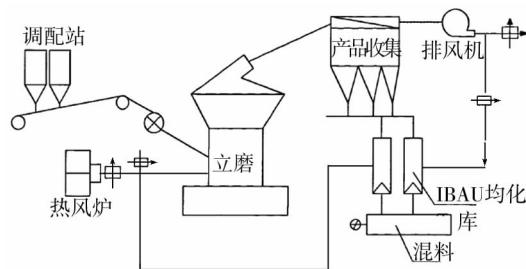


图 8 立磨终粉磨工艺流程

Fig. 8 Flow process on final grinding of vertical mill

1.4 筒辊磨

筒辊磨又称辊筒磨或 HORO 磨,是由法国 FCB 公司于 20 世纪 90 年代开发的一种节能粉磨设备^[17]。该磨机于 1992 年应用于工业生产,目前有 2 种,即 Horomill 磨(法国 FCB 公司)和 Cemax 磨(丹麦史密斯

公司)^[15]。现在全球共有几十台投入使用,最大生料粉磨系统的台时产量为达 225 t/h,水泥粉磨系统台时产量达 130 t/h^[18]。筒辊磨的主要工作部件由筒体和磨辊组成,结构见图 9,工作原理与辊压机相似,都是以料床粉碎原理为主,采用中等压力、靠多次挤压方式破碎、粉磨物料(见图 10),具体如下:磨辊水平置于旋转的筒体内,辊子施加向下的研磨压力(一般为液压力),物料由进料口喂入,经过离心区紧贴筒体,再进入粉磨区,在刮料板、导料板的作用下,在粉磨区被挤压 4~6 次后通过出料区从磨内卸出^[19-20]。

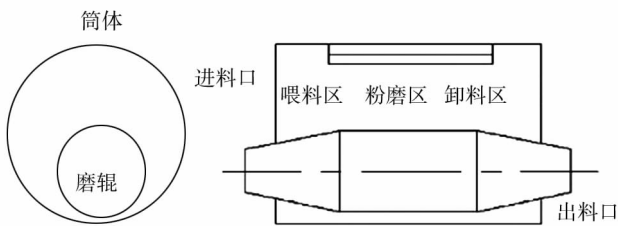


图 9 筒辊磨的结构

Fig. 9 Structure of HORO mill

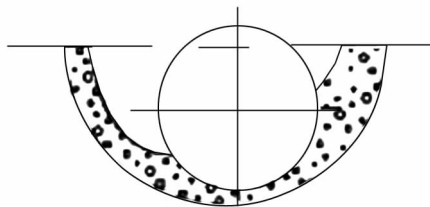


图 10 筒辊磨挤压物料示意图

Fig. 10 Extrusion illustration of HORO mill

筒辊磨与其他粉磨设备相比,最大的区别在于挤压通道形式不同,这种挤压通道使筒辊磨具有以下特点:1)筒辊磨的粉磨效率近似于辊压机的,安全运转的可靠性近似于球磨机的;2)出磨物料不结饼,无需打散机,可直接进入选粉机;3)压力中等,多次碾压,无需风扫;4)工艺流程简单,主机设备少,操作灵活方便,占地少;5)运转率高,且对物料的适应性强,品种更换容易^[18]。筒辊磨属于第 3 代水泥粉磨设备,在理论上兼具辊压机的粉磨效率与球磨机的运转可靠性,既可用于水泥生料粉磨,也可用于水泥终粉磨,有良好的应用前景。由于应用时间短,生产中还存在一些问题,因此结构还有待完善。

1.5 高效选粉机节能高产技术

选粉机是现代水泥粉磨系统的主要组成设备,高效选粉机的选择与应用成为水泥工业重要的高效节能技术之一。选粉机相继经历了第 1 代选粉机(即离心式选粉机)、第 2 代选粉机(即旋风式选粉机)和第 3 代选粉机(即 O-Sepa 高效涡流选粉机)。O-Sepa 选粉机是第 3 代选粉机的代表,选粉效率高,处理能力强,常用于生产能力为 100 t/h 以上的球磨机闭路粉磨系

统,节能、高产效果明显。其工作原理如下:物料从入料口进入选粉机,落到撒料盘上,在旋转的撒料盘作用下物料均匀地分散到选粉区,来自磨机的气流从一次风管进入选粉机,来自收尘器的气流由二次风管进入选粉机,一次风和二次风经导向叶片作用后进入选粉机分级物料;物料在选粉区下落过程中得到多次重复分级的机会,粗颗粒最后落入集料斗,经过环境进入的三次风再次分选,部分粘附在粗颗粒上的细粉被三次风带起上升,粗颗粒则从下部卸出,返回磨机重新粉磨,合格的细粉随气流由细粉出口排出(见图 11)。与传统的离心式、旋风式选粉机相比,使用 O-Sepa 水平涡流选粉机可提高粉磨系统产量 30%~50%,降低单位能耗 5%~20%或更多,且具有分级精确、处理粉料量大、选粉效率高、操作简单等优点^[21-23]。随着技术的进步,在 O-Sepa 选粉机的技术基础上,其内部被改进、创新,效果更优异。国外以 Sepax 型(丹麦)、SKS 和 Sepo I 型(德国)、SD 型(美国)、TSV 型(法国)高效动态选粉机为代表,国内以 DS 组合式高效选粉机(安徽省合肥水泥研究院研制)为代表^[24-25]。

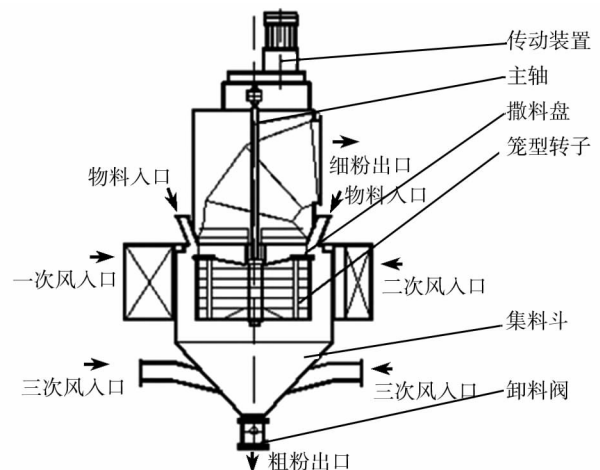


图 11 O-Sepa 选粉机结构

Fig. 11 Structure of O-Sepa classifier

2 选用高性能水泥助磨剂——高效节能粉磨的另一种措施

近年来,水泥助磨剂广泛应用于水泥工业生产中。助磨剂作用于水泥粉磨过程中,有利于提高粉磨效率,降低粉磨电耗,减少熟料用量而增加工业废渣使用量,并改善水泥性能和降低水泥生产成本,已成为水泥行业节能减排的重要技术和产品之一。水泥粉磨过程中,物料颗粒在机械力作用下,通过碰撞、挤压、研磨等作用使颗粒不断产生裂缝,并使裂缝扩展形成新的表面,从而使物料细化(块状—颗粒—细粉)。这个过程可认为是体积粉碎和表面粉碎或破碎

和粉磨细化2个阶段的叠加^[26-27](见图12)。颗粒微细化的同时,体系比表面积逐渐增大,粉体表面结构不断趋于无定形化,表面自由能增大,颗粒表面的化学反应活性升高,使颗粒表面处于亚稳高能活性状态。这些表面存在许多活性点的颗粒容易相互粘附,引起颗粒团聚现象^[28-29]。另外,水泥颗粒产生裂纹时,会在裂纹两侧形成大量的 Si—O 共价键和 Ca—O 离子键的断键,释放许多静电荷,这些断键或电荷若没有被外来离子或分子屏蔽时,会彼此吸引,断裂面重新愈合,从而使颗粒之间重新集结形成大颗粒^[30-31]。上述不利因素导致粉磨达到一定程度时,即会出现颗粒粉碎与微细颗粒团聚速度相等的“平衡状态”,造成粉磨效率的严重降低。

助磨剂多数为极性有机分子,属于表面活性剂。一方面其吸附于粉体表面上形成吸附层,减小表面自由能和界面张力,降低颗粒的强度或硬度;另一方面吸附在颗粒微裂纹之间,提供外来离子和分子去中和

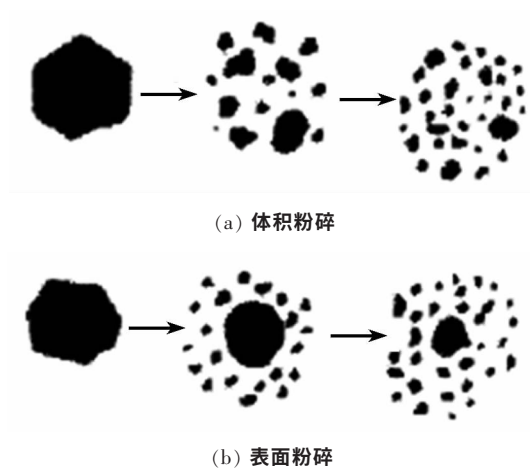


图12 物料粉磨模型

Fig.12 Materials grinding model

断面未饱和电荷,阻止断裂面的重合,使裂纹更容易扩展,从而防止粉体颗粒相互团聚,起到分散和防止聚集的作用^[32](见图13、14)。

实践证明,水泥工业使用助磨剂一方面可提高粉



图13 助磨剂在水泥颗粒表面和断裂面的吸附

Fig.13 Adsorption of grinding aids in cement particle surface and fracture surface

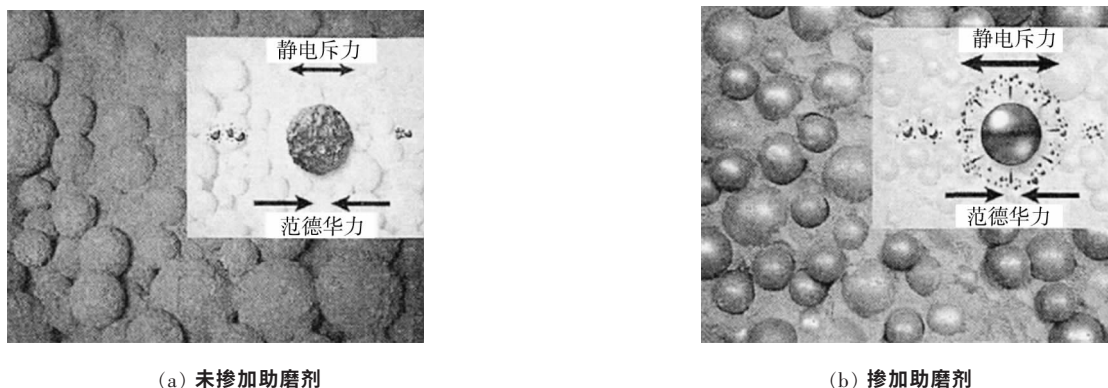


图14 助磨剂的作用效果

Fig.14 Effect of grinding aids

磨效率,增加水泥台时产量(平均达10%~20%),从而降低粉磨电耗10%~20%;另一方面,由于水泥助磨剂还可以激发或提高工业废渣的化学活性,减少水泥中熟料用量和增加工业废渣的利用率,不仅有效利用了废渣,而且降低了生产熟料造成的煤、电、资源等的消耗,并减少CO₂和大气污染物的排放;因此,助磨剂不仅能实现节能增产,也能发挥减排的作用。此外,与其

他节能减排途径相比,助磨剂简单实用,投资少,见效快,几乎不需要增加任何固定投资,直接在水泥粉磨中掺入使用后,经济和社会效益均较可观^[33-35]。

3 粉磨技术的选择与应用——从技术和经济角度选择

随着新型干法水泥生产的发展,除了水泥粉磨设

备的多样化和大型化、选粉机的更新换代、高性能助磨剂的应用等发挥节能增产作用之外,采用变频调速技术,降低系统装机容量,减少粉磨系统辅助设备,提高设备安全运转率及磨内结构改造等措施也产生了较好的高效节能效果^[36-39]。由于各种节能粉磨技术存在一定的差异和适应性,因此水泥粉磨中对高效节能

粉磨技术的选择与应用变得尤为重要^[40]。以粉磨系统的选用为例,当前国内广泛采用的系统是球磨机(闭路)系统、辊压机与球磨机构成的联合粉磨系统和立磨系统。从技术和经济角度对这 3 种粉磨系统进行比较^[41-43],结果如表 1^[41]所示。

选择适宜的粉磨系统取决于很多因素,最重要的

表 1 3 种粉磨系统的比较

Tab. 1 Comparison of 3 kinds grinding systems

项目	球磨机	联合粉磨系统	立磨系统
工艺流程复杂程度	较简单	复杂	较简单
维护情况	相对简单	较复杂	较复杂
占地	较多	最多	最少
水泥质量市场认可情况	广泛认可	广泛认可	未被广泛认可
生产多品种水泥时的灵活性	不灵活 (转换水泥品种的时间较长)	中等	最灵活
烘干能力	弱(入磨水分的质量分数应小于 4%)	弱	强(允许最大入磨水分的质量分数为 15%~20%)
粉磨效率 (粉磨普通硅酸盐水泥 P.O 42.5 ⁺ 比 表面积约为 350 m ² /kg 时)	产量较低	可达到高产量	可达到高产量
粉磨能耗/(kW·h·t ⁻¹)	34~36	28~30	26~28
研磨件平均寿命/年	>3	>2	>2
平均年运转率/%	80~95	80~85	85~90
总投资相当量(以球磨机为基准)	100	125	130

因素如下:1)生产水泥的品种。包括混合材的种类和含量,入磨物料的综合水分和易磨性,要求粉磨的细度,水泥性能的要求如和易性和其他特殊要求;2)粉磨系统产量要求。对于产量非常大的情况应采用辊压机联合粉磨系统;3)终粉磨系统的效益。受当地能源价格的影响很大;4)粉磨系统的运转率。受操作维修人员水平的影响很大,球磨机对人员的操作水平的要求最低^[41,44-46]。

由此可见,球磨机系统尽管能耗高效率低,但是其投资相对小,工艺及维护简单,目前仍占主导地位,尤其在粉磨高熟料比例的水泥时更是如此,此外球磨机闭路系统还应用于劣质无烟煤的煤粉制备。联合粉磨系统很好地兼顾了普通硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥等多品种水泥的生产,其不仅在粉磨中能快速转换粉磨品种,而且能量利用率高。联合粉磨系统和球磨系统适合生产粒度很小的水泥,但其对入磨物料水分或湿度敏感。在粉磨很湿的物料时立磨系统是最好的选择,由于工业废渣一般水分较大,因此立磨适用于粉磨粒化高炉矿渣或钢渣掺量质量分数大于 50%的矿渣水泥或粉磨大掺量火山灰质水泥。由于立磨在粉磨细度要求较高的物料时,其磨机运行的平稳性会降低,因此立磨不太适合粉磨很细的硅酸盐水泥,尤其生产勃氏比表面积 450 m²/kg 以上的水泥是很困难的^[41,47-50]。目前立磨在水泥生料粉磨、

煤粉制备、高炉矿渣粉磨等方面占主导地位。

4 结论

1)随着现代粉磨技术的不断进步,水泥粉磨工艺也已经由以球磨机为主,发展为节能高效的球磨机与辊压机、立磨、筒辊磨及高效选粉机等多种新型粉磨设备并用的工艺组合系统,并向粉磨设备大型化、组合化和高效化发展。

2)通过对现有粉磨系统的改进或局部优化改造,如新增预粉磨或细破碎、开路改闭路、选用高效选粉机、改变磨机结构(衬板、研磨体、仓体)等,可提高粉磨系统的产量和质量。

3)借助水泥助磨剂技术,可有效消除由粉磨过程中微细颗粒团聚并附着在磨机衬板和研磨体表面而造成粉磨效率较低和过粉磨现象。合理使用高效水泥助磨剂,可在有效提高磨机粉磨效率的同时较大幅度地优化水泥粒度和颗粒级配,并改善水泥的一些重要性能,这也是当今高效节能粉磨工艺的关键技术途径之一。

4)粉磨技术的选用受物料种类、系统工艺参数、效率和效益等多种因素的影响,从技术和经济角度合理选择最佳粉磨技术,对高效节能粉磨至关重要。

参考文献(References):

[1] 陶从喜,赵林,余为民,等.水泥工业节能减排技术及装备的研究

- 进展[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28 (5): 980-985.
- [2] 余立中, 任文莲. 水泥粉磨技术的进展[J]. 水泥工程, 1999 (5): 1-6.
- [3] 王英, 何其昂. 水泥粉磨技术与装备进步[J]. 建材发展导向, 2003 (增刊 1): 52-55.
- [4] 冯蕾, 王政, 李家和. 粉磨工艺对水泥性能影响的研究[J]. 水泥技术, 2004 (6): 49-51.
- [5] 何敏, 李邦宪. 磨机并联储流粉磨系统改造[J]. 中国水泥, 2004 (8): 46-48.
- [6] 王美园, 张永龙. 水泥粉磨系统的比较与选择[J]. 中国水泥, 2006 (1): 55-57.
- [7] TOUIL D, BELAADI S. Energy efficiency of cement finish grinding in a dry batch ball mill[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36 (3): 416-421.
- [8] 沈君麟, 杨连国. 中卸式柱磨机与辊压机、立磨、卧辊磨的工作原理及特点相比较[J]. 中国粉体工业, 2007 (2): 18-21.
- [9] WANG J H, CHEN Q R, KUANG Y L, et al. Grinding process within vertical roller mills: experiment and simulation [J]. Mining Science and Technology, 2009, 19 (1): 97-101.
- [10] 张永龙, 王虔虔, 王青. 国产大型辊压机及节能粉磨方案[C] // 中国硅酸盐学会科普工作委员会, 建筑材料工业技术情报研究科, 全国水泥科技情报信息网. 2007 年水泥技术交流会暨第九届全国水泥技术交流会论文集, 2007: 174-187.
- [11] 王仲春, 曾荣. 辊压机联合粉磨系统技术综论[J]. 中国水泥, 2005 (3): 50-53.
- [12] 韩仲琦. 现代水泥粉磨技术的发展[J]. 山西建材, 2003 (3): 8-12.
- [13] 张路明. 国内外立磨发展概况及 LGMS4624 矿渣立磨的研制与使用(二)[J]. 矿山机械, 2008, 36 (5): 65-69.
- [14] HAO X D, ZHU D M, BIAN Z R, et al. Numerical analysis of grinding power consumption of a vertical planetary mill[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 18 (2): 311-315.
- [15] 张路明. 国内外立磨发展概况及 LGMS4624 矿渣立磨的研制与使用(一)[J]. 矿山机械, 2008, 36 (3): 62-68.
- [16] 高长明. 立磨——现代水泥工业中的首选粉磨设备[J]. 中国水泥, 2003 (7): 45-46.
- [17] 熊会思, 熊然. 新型干法水泥厂设备选型使用手册[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2007: 369-370.
- [18] 罗明. 我国水泥粉磨系统主机装备的技术应用现状[J]. 四川建材, 2011 (6): 201-202.
- [19] GENC, O, BENZER A H. Horizontal roller mill application versus hybrid HPGR-ball milling in finish grinding of cement[J]. Minerals Engineering, 2009, 22 (12): 1344-1349.
- [20] 邹德芳, 姚长盛, 张红军, 等. 高效节能的粉磨设备——筒辊磨[J]. 科技创新导报, 2008 (19): 81.
- [21] 王磊明, 陈滔. O-Sepa 高效涡流选粉机的应用和发展[J]. 江西建材, 2006 (2): 16-19.
- [22] 陈绍龙. 山东省水泥工业节能减排新技术[C] // 王继扬. 山东省材料发展报告(2007—2008)·北京: 中国建材工业出版社, 2008: 181-189.
- [23] 陈绍龙, 张朝法, 李福州. 水泥生产破碎与粉磨工艺技术及装备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 76-87.
- [24] 郑青. 选粉机技术的发展和闭路粉磨系统的优化[J]. 新世纪水泥导报, 2004 (4): 11-13.
- [25] 池铁军. DS 型组合高效选粉机的结构创新[J]. 消费导刊, 2008 (11): 181.
- [26] 陆厚根. 粉体技术导论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1998: 112-155.
- [27] MOOTHEDATH S K, AHLUWALIA S C. Mechanism of action of grinding aids in comminution[J]. Powder Technology, 1992, 71 (3): 229-237.
- [28] KATSIOTI M, TSAKIRIDIS P E, GIANNATOS P, et al. Characterization of various cement grinding aids and their impact on grindability and cement performance[J]. Construct Building Materials, 2009, 23 (5): 1954-1959.
- [29] 许艳丽. 高效水泥助磨剂及其应用性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2009: 43-46.
- [30] ANNA B, TIZIANO C, MARIAGRAZIA G, et al. Grinding aids: a study on their mechanism of action[J]. Mapei, 2001, 22: 1-10.
- [31] 丁向群, 赵苏, 凌健, 等. 水泥助磨剂的研究及应用概况[J]. 材料导报, 2004 (6): 61-63.
- [32] ZHANG T, SHANG S, YIN F, et al. Adsorptive behavior of surfactants on surface of Portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31 (7): 1009-1015.
- [33] 杜亮波, 周伟林, 刘加平, 等. 水泥助磨剂的研究进展[J]. 材料导报, 2009 (11): 80-84.
- [34] 席耀忠. 水泥厂使用助磨剂的各种效益[J]. 水泥, 2008 (12): 28-29.
- [35] 谢磊. 酯化三乙醇胺类新型水泥助磨剂的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 1-3.
- [36] 赵义, 周志群. 提高水泥粉磨效率的有效途径[J]. 河南建材, 2001 (2): 24-29.
- [37] 韩仲琦. 大型节能水泥粉磨技术的发展[J]. 中国粉体技术, 2000, 6 (增刊 1): 49-52.
- [38] 刘惠章, 江集龙. 水泥粉磨高产优质、节能降耗的几点思考[J]. 山东建材, 2007 (6): 10-12.
- [39] 何军. 水泥粉磨设备改造的探讨[J]. 中国建材科技, 2009 (8): 58-60.
- [40] 高长明. 当代水泥工业粉磨装备选型趋势分析[J]. 水泥技术, 2006 (2): 18-22.
- [41] ING R S, POLYSIUS A G, BECKUM, et al. Selection of finish grinding system according to technical and economic points of view[C] // 中国硅酸盐学会. 2009 国内外水泥粉磨新技术交流大会论文集, 2009: 270-280.
- [42] OLIVEIRA J F G, SILVA E J, GUO C, et al. Industrial challenges in grinding[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58 (2): 663-680.
- [43] NAKACH M, AUTHELIN J R, CHAMAYOU A, et al. Comparison of various milling technologies for grinding pharmaceutical powders[J]. International Journal of Mineral Processing, 2004, 74 (Suppl. 1): 173-181.
- [44] MUSA F, MORRISON R. A more sustainable approach to assessing comminution efficiency[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(7/8): 593-601.
- [45] WANG Y, FORSSBERG E. Enhancement of energy efficiency for mechanical production of fine and ultra-fine particles in comminution[J]. Particuology, 2007, 5 (3): 193-201.
- [46] 邹伟斌. 水泥粉磨工艺发展趋势及改造要点[J]. 四川水泥, 2008 (2): 23-27.
- [47] BENZER H, ERGUN L, LYNCH A J, et al. Modeling cements grinding circuits[J]. Mineral Engineering, 2001, 14 (11): 1469-1482.
- [48] 何宏涛. 水泥粉磨系统的改造[J]. 水泥技术, 2007 (4): 45-48.
- [49] NORRGRAN D, SHUTTLEWORTH T, RASMUSSEN G. Updated magnetic separation techniques to improve grinding circuit efficiency[J]. Minerals Engineering, 2004, 17 (11/12): 1287-1291.
- [50] 李建功, 许卫革, 袁曙光. 水泥联合粉磨系统的探讨[J]. 矿山机械, 2008 (19): 92-95.