

水泥科技

2
2019

SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CEMENT

善用资源 服务建设



主办单位：

合肥水泥研究设计院有限公司

Email: snkj@hcrdi.com

水泥科技

(季刊 1988年创刊)

2019年第2期

主办单位:

合肥水泥研究设计院有限公司

编委会

名誉主任: 周云峰

主任: 包 玮

副主任: 朱大来、丁奇生

主 编: 陆树标

委 员: (按姓氏笔划排序)

王仕群 王学敏 毛志伟 邓小林

朱文兵 许 涛 邱文斗 何宏涛

张平洪 张自力 陆树标 武青山

林红星 周 啸 郑 青 侯贵斌

施德祥 姚 强 熊焰来

本期编辑: 解姗姗 胡春静

编辑出版: 《水泥科技》编辑部

地 址: 合肥市望江东路60号

邮 编: 230051

编辑部电话: (0551) 63439575

广告部电话: (0551) 63439575

传 真: (0551) 63439575

网 址: <http://snkj.hcrdi.com>

投稿邮箱: snkj@hcrdi.com

目 次

一种稳流型定量喂煤粉控制系统

..... 鹿建森/ 1

CP HE6 1029R/1035R型篦式冷却机改造

..... 华俊 /10

生物质锅炉烟气治理方式探讨

..... 廖玉云/16

骑辊式辊压机电动进料装置原理及应用

..... 高霖 /21

大直径预应力混凝土筒仓设计与经济性分析

..... 蒋守锋/26

HRM型全外循环生料立式磨及其粉磨系统的
研究与应用

..... 熊会军/34

基于sc-tetra的混料机混料效果数值模拟对比研究

..... 朱守刚 杨勇 /41

钢丝胶带提升机在密相干塔脱硫装置中的应用

..... 袁明辉/51

基于PCS7的水泥粉磨控制系统的设计与应用

..... 刘军 /62

水泥粉磨状态监测与故障诊断方法探讨

..... 宋传杰/64

一种稳流型定量喂煤粉控制系统

鹿建森

(合肥固泰自动化有限公司, 安徽 合肥 230051)

1 引言

在水泥工业的生产过程中, 向回转窑和分解炉内喂煤粉, 是水泥厂烧成系统的关键环节之一, 稳定的煤粉计量与自动控制, 对提高熟料产量和质量、增强水泥生产的自动化和管理水平、节约能源、减少有害气体排放, 以及提高劳动生产率和企业的经济效益等方面起到重要的作用。窑系统喂煤量波动失控, 会导致煤粉不完全燃烧, 造成能源浪费, 同时使一氧化碳超标, 进而引起窑尾废气温度及气体成分含量的变化, 还有可能造成预热器结皮、堵塞, 甚至造成停窑事故, 直接影响窑的运转率和台时产量, 从而影响工厂的经济效益。因此, 必须选用计量准确, 连续喂煤量稳定、可调, 响应速度快, 对煤粉特性(煤种、细度、水分等)适应能力强的喂煤粉与控制系统, 以达到提高熟料的产量和质量, 节约能耗, 降低企业的生产成本的目标。

2 煤粉的特性及对定量喂煤粉控制系统的要求

煤粉具有颗粒细、容重小、流动性较好、易受环境温度和压力影响等特性, 而煤粉的水分含量稍高则又容易堵、结, 定量控制十分困难。随着水泥生产技术和装备水平的不断进步、单线生产能力和规模日益大型化, 对定量喂煤系统的要求也越来越高。鉴于煤粉的以上特性以及实际工况的需要, 一个好的定量喂煤粉控制系统必须具备以下要求:

(1) 喂煤均匀, 运行平稳, 性能可靠, 既能防止冲煤, 又能防止煤粉棚仓, 受控性能好。计量装置灵敏度要高, 抗干扰性能强, 既能检测小流量时信号的变化, 又能不易受外界干扰的影响, 使短期精度和长期精度都较高, 长期稳定性要好。

(2) 计量控制范围要宽，既能满足开窑时用煤量较少的要求，又能满足正常时和大量时的要求，可方便地大范围改变喂煤量，而不降低计量精度。

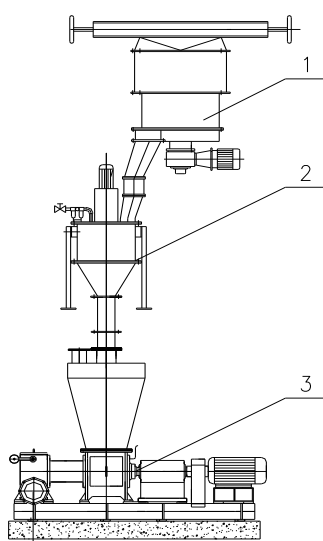
(3) 自动化程度要高，功能强，适应现代化大中型水泥厂的自动化控制要求。

3 水泥生产过程中入窑生料计量与定量给料系统的概况

经过多年的开发研究和经验积累，对于喷煤的定量控制系统，目前国内外基本结构思路趋于一致，整个系统可分为三个环节组成：喂煤、计量和输送，三个环节缺一不可而又相互制约。特别是对于采用气力输送的煤粉定量喂煤，输送气体对于喂煤稳定性和计量精度的影响需要仔细的予以解决，所以往往形成一个复杂的气固二相系统，目前有三种形式：

3.1 喂煤、计量和输送三个环节分别处理

典型应用就是由给料装置、流量计和输送锁风装置组成的定量喂煤控制系统。给料装置大多采用调速的水平分格轮、螺旋给料机等；流量计常用冲板流量计、科力奥利流量计等；锁风装置采用螺旋泵、分格轮等。这种形式最主要的问题是各个环节相互影响，特别是有些形式的给料装置和流量计对压力气体十分敏感，为消除气流影响，整个系统结构复杂；另外，这种结构形式的给料调节滞后、实际喂料控制精度低。

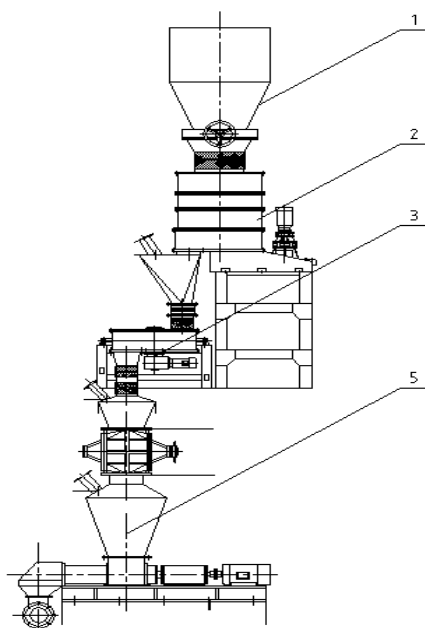


1 喂料机 2、流量计 3、锁风装置

图1 喂煤、计量和输送三个环节分别处理定量喂煤粉系统

3.2 喂煤和计量合成一个环节。

计量过程中可以同时调节给料量，如采用调速的双管螺旋秤、环状天平秤等。这种形式使给料和计量同步实施，解决了给料调节滞后、实际控制精度低的问题，但是，对于气力输送过程中的气流对给料和计量的影响，仍然需要单独考虑复杂的锁风环节。



1、煤粉仓 2、喂料机 3、环状天平计重机 4、锁风装置

图2 喂煤和计量合成一个环节的定量喂煤粉系统

该系统的环状天平直径两端设有支点，支点的一端是入口，另一端是出口的水平旋转型天平流量计，煤粉进入后由负载传感器连续检测通过半周的煤粉重量，连同环状天平的转速信号进入控制器。

该系统的特点有：

(1) 容器是天平构造，附着在固定部分的煤粉也被环状天平的旋转自动抵消，经常处于左右均等状态，不会出现零点变化；

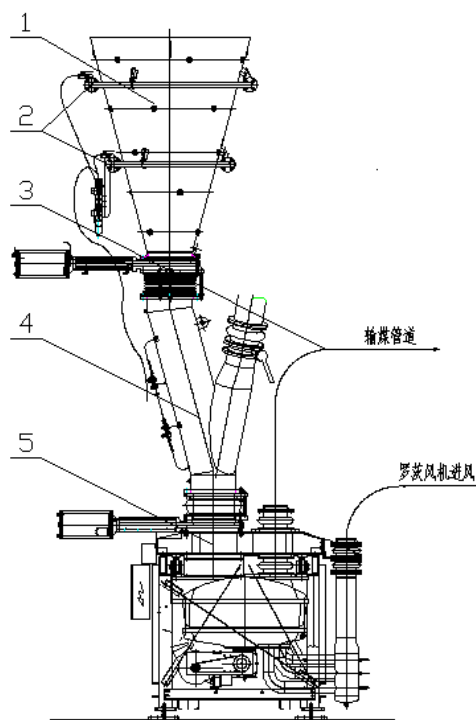
(2) 完全密封构造，不会出现漏粉等现象；特殊的软构造密封耐磨损，磨损较大，一般情况下三个月需更换；采用连续的检测流量方式，和减量方式不同，可不间断地进行检测与控制；

(3) 除了主体的环状天平秤，组成定量喂煤系统还需要配套预给料装置和出煤口锁风装置。其中锁风装置的作用十分关键，如常用的富乐泵等锁风装置一旦

出现磨损就会锁风不严，出现反风，使得送入喷煤管的煤粉不是连续、稳定的，造成火焰不稳定，不利于烧成系统热工制度的稳定，降低了窑砖的使用寿命。

3.3 喂煤、计量和输送集成化。

把喂煤、计量和输送三个环节集成在一台装置上，可以大大减少系统的复杂程度和相互之间的影响，提高控制精度，但对于一体化煤粉定量控制系统本身的开发难度就大大增加。目前有德国菲斯特转子秤实现了三环节集成功能。靠一套助流系统（2）支持，煤粉从煤粉仓（1）流出，集成式转子秤（5）将煤粉进行定量喂料，传送空气（3）从风机中出来，并将煤粉直接吹到燃烧器。转子秤喂料的高精度确保燃烧器中稳定的空气/煤粉混合。使用一个下料管（4）将煤粉仓出口与转子秤（5）相连。



1、煤粉仓 2、助流系统 3、气力输送系统 4、下料管 5、转子秤

图3 喂煤、计量和输送集成化定量喂煤粉系统

该系统存在的主要问题有：

(1) 煤粉水份超标引起结拱，由于转子秤在实际生产过程中可能存在煤粉水份过高及煤质等客观存在的问题，导致煤粉自身流动性下降，甚至会出现仓内及下料管壁结皮现象，从而产生不下煤和冲煤现象，导致系统调节不稳定，引起风

压波动，不利于窑系统热工制度稳定，不利于生产。

(2) 由于气流不畅容易造成气压平衡静态拱，助流系统向仓内部吹入高压空气，消除煤粉的结拱，短时间内有助于下料问题的解决，但是，吹入的大量压缩空气用以形成气浮，把煤粉浮在上面，更不利于下料。

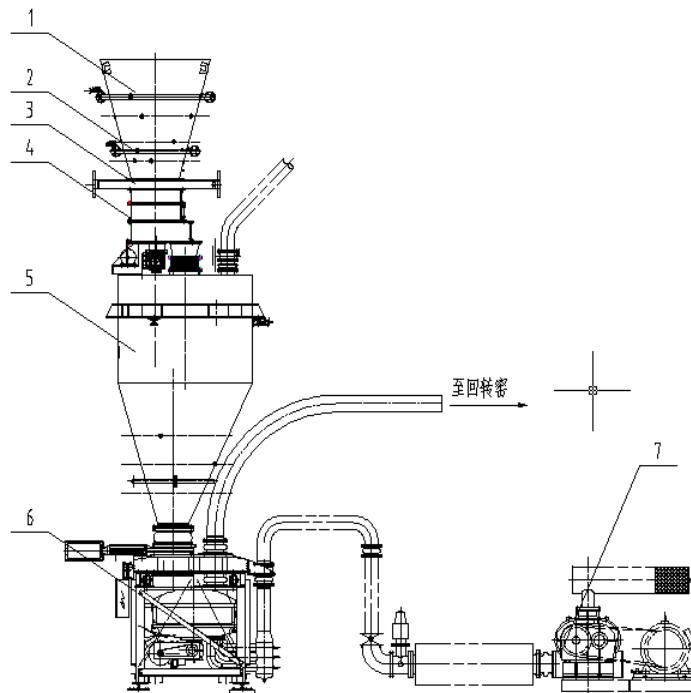
(3) 下料管与锥仓接口过小，容易形成挂壁、结壁，不利于下料。

(4) 由于转子秤是通过煤粉仓一段时间内煤粉的减少量来进行实物标定，国内对煤粉仓仓重的标定不准确，造成转子秤无法实物标定。另外用煤粉仓对转子秤实物标定，必须要切断煤粉仓的进煤，一般煤粉仓的进煤与否是工艺所决定，故对转子秤标定受工艺所限制，不方便。

(5) 煤粉仓仓位控制困难。整个系统的下煤流畅与否，与煤粉仓的仓位控制有很大关系，而煤粉仓的仓位一般由煤源和煤磨等上级工艺设备所决定，不由煤粉称的需求所决定，故容易造成下料不畅。

4 稳流型定量喂煤粉系统

4.1 系统组成



- 1、煤粉仓 2、负压抽吸助卸系统 3、手动螺旋闸阀 4、MPF稳流煤粉喂料机
5、稳流仓 6、CWF分格转子秤 7、罗茨风机

图4 CWF稳流型定量喂煤粉系统

稳流型定量喂煤粉系统的组成如图 4 所示，存储在煤粉仓（1）的煤粉在负压抽吸助卸系统（2）帮助下卸出，通过手动螺旋闸阀（3）、MPF 稳流煤粉喂料机（4）稳定喂入稳流仓（5），然后进入 CWF 分格转子秤（6）。煤粉在分格转子的带动下，通过计量装置计量，由进料点带到出料点，罗茨风机（7）提供的空气由进风管进入分格转子秤，把煤粉输送到回转窑或分解炉的输煤管道。

4.2 MPF 稳流煤粉喂料机和稳流仓

该方案，在煤粉仓与 CWF 分格转子秤之间加一套预给料装置，也就是增加一个喂料机和一个稳流仓。喂料机将煤粉打散、疏松，然后喂入稳流仓，稳流仓的主要目的是使煤粉稳定在一定的料位，从而保证仓压在一定的范围内，有利于煤粉顺畅下流。

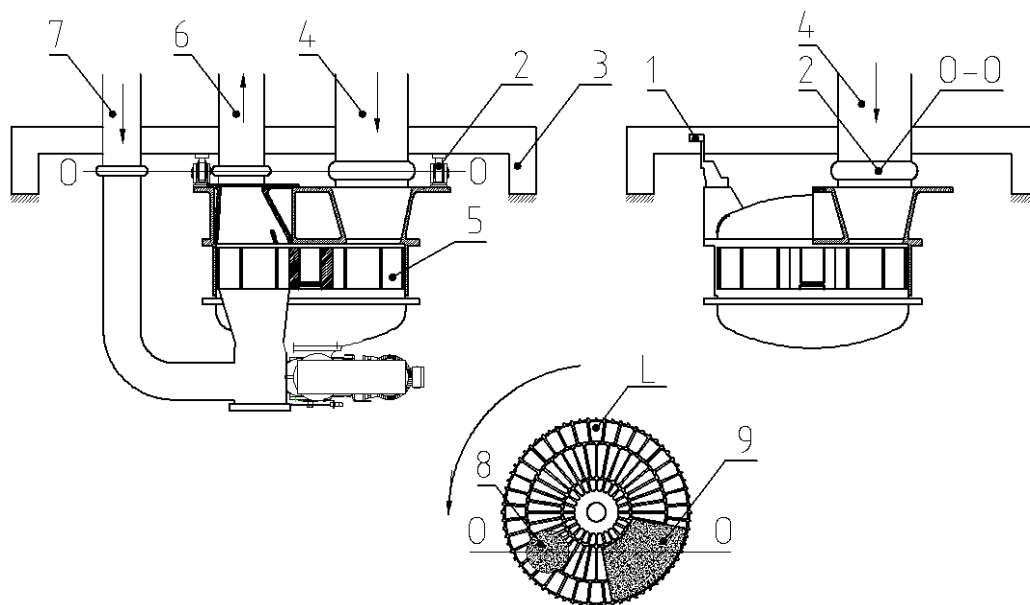
MPF 多层煤粉喂料机，采用专门设计的多层式密封结构，消除了窜料和仓压的影响，保证粉体连续输送，喂料均匀稳定，不会出现结拱、堵塞、漏料等现象。采用变频调速技术，调节范围宽、精度高、运行可靠。系统采用密封设计，没有漏和粉尘飞扬现象，安装方便。

稳流仓是偏心漏斗结构，锥部采用不锈钢材质，仓容合理，能保证煤粉的流动性，产生漏斗效应，同时配合适当的保温和负压抽吸助卸，完全能避免稳流仓结壁，保证下料稳定。稳流仓还能对分格转子秤的标定能实时进行，计量更加准确。

4.3 CWF 分格转子秤

CWF 分格转子秤把传统的煤粉定量喂煤、计量和输送功能集成到一台装置中，专用于采用气力输送煤粉的定量喂煤。它采用重力检测的水平转子的工作原理，煤粉进入转子带入称重区，计量后直接进入气力输送管路，让后由罗茨风机提供的输送空气输送到工艺中去。无论什么时候通过转子称重区的煤粉重量都由称重装置 L 计量下来。煤粉重量及其所在的位置都存储在分格转子秤的控制系统内，也就是说，在煤粉卸出之前即已知道转子各部位的荷重情况。为了使预先确定的设定值和存储在控制系统内的煤粉量相适用，在卸料点处要求分格转子角速度已

预先计算出来，并由转子驱动装置来驱动。通过这种预期控制原理，分格转子秤可对任何波动予以校正并达到短期高精度度。



1 荷重传感器 2 悬挂装置 3 基础框架 4 进料管 5 转子扇区 6 出料管
7进风管 8 出料区 9 进料区 0-0悬挂轴 L称重区

图5 CWF分格转子秤结构示意图

CWF 分格转子秤的主要特点：

(1) 直接测量分格转子内的物料质量，计量精度不受气流、物料特性的影响。把传统的煤粉定量喂料、计量和锁风功能集成到一台装置中，结构紧凑，占空间小，减少了基建投资。

(2) 可调整式刚性锁风技术。利用分格转子和密封板形成的微小间隙来实现锁风功能，替代目前普遍使用的独立螺旋泵、分格轮等锁风装置，同时，随着设备磨损可在线调整。

(3) 可整体拆卸式具有预判功能的密封技术。轴承的密封采用密封支架形式的结构，容易更换密封件，共采取五道密封措施和观测孔结合的形式，在轴承最后一道密封前设置观测孔，当前面四道密封件损坏，粉体从观测孔流出秤体外面，提醒维修工更换密封件，从而保证了轴承的终身使用寿命。

(4) 自动校正式轴头连接。驱动轴和分格转子采用独特的轴头连接，相比键连接的强度要高，寿命要长。独特的结合形式，能随着转子和密封板的磨损而自

动调整，因而从结构上保证了设备的高寿命。

(5) 带预期控制功能的自动控制系统。系统将任何时刻通过分格转子称重区的粉体重量都由称重装置计量下来。通过预期控制原理，该系统可对任何波动给予校正以提高精确度。通过对瞬时粉体的不间断称量，采用积分分离的 PID 算法，连续监视和控制转子的转速。

4.4 系统特点

稳流型定量喂煤粉系统是把 CWF 分格转子秤与 MPF 稳流煤粉喂料机有机结合组成的喂煤粉系统，该系统具有如下特点：

(1) 用稳流仓取代传统的下料管：由于下料管比较细，壁附近粘性大、流动性差，容易造成结壁。用稳流仓后能保证煤粉的流动性，即漏斗效应。同时配合适当的保温和喷吹，完全能避免稳流仓结壁。

(2) 负压抽吸助卸技术：消除煤粉仓内的煤粉静态拱。我们采用先进的负压抽吸喷吹技术的气力助流装置，以压缩空气(空气压力约 6 个大气压)为动力，射流气枪喷射，使料拱塌落。再将煤粉仓内的正压气体抽出，消除了起拱条件，保证下料流畅平稳。

(3) 接口设计：由于煤粉仓和喂料机的接口至少为 $\Phi 800\text{mm}$ ，不存在煤粉在接口处挂壁，结料。

(4) MPF 多层煤粉喂料机：采用专门设计的多层式密封结构，消除了窜料和仓压的影响，保证粉体连续输送，喂料均匀稳定，不会出现结拱、堵塞、漏料等现象喂料机内有搅拌器，使物料充分流化，避免粘壁，消除物料死区有利于下料顺畅。

(5) 煤粉仓位控制比较自由：由于每个厂的情况不尽相同，操作者可根据本厂的实际工艺要求合理将煤粉设定在一定的仓位，确保喂煤连续、稳定。

实物标定、计量更准确：由于稳流仓的料位能实时控制，故对分格转子秤的标定能实时进行，计量更准确。

5 稳流型定量喂煤粉系统的应用

稳流型定量喂煤粉系统研制成功后投入多条熟料水泥生产线运行,如台泥(安顺)水泥有限公司 2×4000 t/d 新型干法线、台泥(重庆)水泥有限公司 2×4600 t/d 新型干法线、台泥(广安)水泥有限公司 4500 t/d 新型干法线、泸州赛德水泥有限公司 5000 t/d 新型干法线、云南省活发集团刘总旗水泥有限公司 2500 t/d 新型干法线等多条生产线。另外,还对多家其它厂家进行了改造,效果良好,如台泥昌庆水泥有限公司 4500 t/d 新型干法线、华菱川煤水泥有限责任公司 2500 t/d 新型干法线等。

6 结束语

稳流型定量喂煤粉系统把 CWF 分格转子秤与 MPF 稳流煤粉喂料机有机结合,把传统的煤粉定量喂料、计量和锁风功能集成到一台装置中,结构紧凑,占用空间小,减少了基建投资,适用于采用气力输送煤粉的定量喂煤。该系统已成功应用于 2500t/d 至 6500t/d 的新型干法水泥熟料生产线的回转窑和分解炉喂煤,运行稳定,计量精度高,稳定了窑系统的热工制度,提高了孰料的质量,得到了用户的广泛认可和好评。并可推广到水泥行业以外工业窑炉的定量喂煤粉,如球团、石灰窑、镍业等行业,具有显著的经济效益和社会效益,推广前景良好。

参考文献:

- [1] 鹿建森等, 分格转子定量喂煤装置的研究与开发 [C], 2011.1, 水泥科技。
- [2] 侯贵斌等, 水泥厂粉体物料计量技术的应用现状[C],2006.9,水泥
- [3] 彭建华等, 煤粉计量系统的改进[C],2004.3,新世纪水泥导报
- [4] 周啸, KXT 科氏力秤煤粉计量与控制系统[C], 2002.4, 新世纪水泥导报

CP HE6 1029R/1035R 型篦式冷却机改造

华俊

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

华润惠州 3000t/d 生产线采用 CP 公司 HE61029R/1035R 型篦式冷却机。该型篦冷机是第三代往复推动式篦冷机, 采用液压传动, 篦床有效面积 67.7 m^2 , 分两段传动, 冲程为 120 mm, 设计产量 3 000 t/d, 2014 年 8 月借助对烧成系统改造的机会对篦冷机实施了局部改造

1 生产中存在的问题

- (1) 三次风温不高, 热回收效率低 (三次风温 $\leq 800^\circ\text{C}$);
- (2) 篦冷机熟料冷却效果差, 出篦冷机熟料温度 ($180\sim 200^\circ\text{C}$) 高;
- (3) 产量偏低, $3100\text{t/d}\sim 3200\text{t/d}$, 厂方希望产量 $\geq 3300\text{t/d}$;
- (4) 篦床两侧“红河”现象严重, 侧板容易烧毁, 漏料严重, 更换频繁;
- (5) 充气梁及活动框架充气梁内积料严重, 影响冷却效果。

2 篦冷机的现状分析

(1) 现有篦冷机结构上考虑了固定端熟料急冷, 但供风分区不合理, 固定端篦床两台风机一台对前三排固定篦板供风, 另一台对后三排固定篦板供风, 由于中心区落料点处料层厚、料层阻力大, 周边区域料层薄、料层阻力小, 整个固定端篦床容易产生偏风现象, 急冷效果差。

(2) 篦冷机高温回收区部分热交换不充分, 造成了前段热回收差, 熟料冷却效果较差的情况。充气梁采用的是斜缝篦板 (如图 1 所示) 该篦板的特点是:

a、风速较高, 冷却风沿篦缝吹向前上方, 对熟料输送有明显的助推作用, 故而实际操作中经常出现两侧熟料因流速过快而没有得到及时冷却, 容易造成两侧的“红河”现象。

b、在风机不开或者风机开度较小时，容易从篦缝处渗落熟料颗粒堵塞空气梁供风管道，造成通风不畅，目前半年左右需清理空气梁供风管道一次。

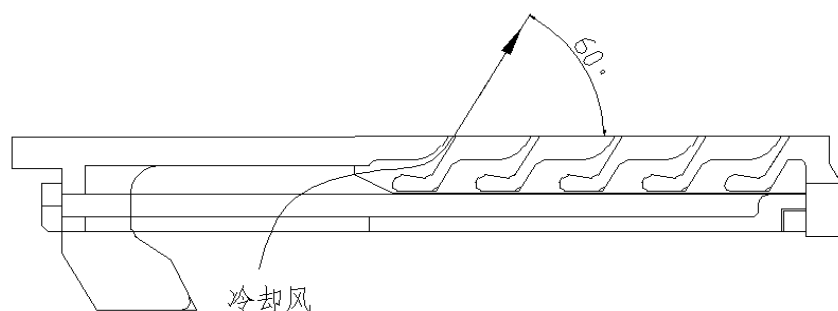


图 1 斜缝式篦板结构示意图

(3) 一段篦床中部区域全部采用风室供风，忽略了中部区域熟料较厚、料层阻力大的特点，而且目前配置的风机压头较低，导致冷却风无法穿透较厚的料层，影响于熟料的冷却与热交换。

(4) 因结构及场地原因，篦床面积无法增加。原设计产量是 3000 t/d，实际超产 100~200 t/d，目前单位篦床面积负载较高，达到 47.2 t/m²d，导致出篦冷机出料温度较高。

(5) 该生产线采用的是小窑门罩结构，三次风是从篦冷机的中前部（二、三室上方）抽取，抽取风温较低。由于三次风温较低，影响分解炉煅烧。

(6) 目前因产量超出正常生产能力，液压系统负载较大，经常出现报警现象，尤其二段压力较高，液压系统运行压力过高时会导致篦冷机跳停现象。

(7) 篦冷机原配风部分风机压头较小，如一段篦床 1~4 室的室风机整体压头偏低 2000Pa 左右，一段充气梁风机的压头偏低 1500Pa 左右，导致篦床无法厚料层操作，减少了熟料在篦床上的冷却时间，从而影响了冷却效果，原篦冷机配风列于表 1。

(8) 原篦板结构采用 T 型螺栓固定（见图 2），并配弹簧连接，篦板采用组合式结构，存在以下问题：

a、篦板固定仅靠一个螺栓连接，并且篦板和篦板梁之间的 V 型槽如果加工角度不合格的情况下，T 型螺栓无法固定牢靠，另外 T 型螺栓在卡歪的情况下也容

易导致篦板的脱落。

b、弹簧在长时间压紧，或者高温情况下，弹性容易失效，在遇到撞击或者篦床负荷比较大的时候，T型螺栓容易产生松动，从而导致篦板脱落。

c、采用组合式篦板设计，上下两块篦板在遇到撞击时容易产生错位，导致篦板脱落。

表 1 篦式冷却机改造前篦冷机风机配置表

序号	风量 (m ³ /h)	风压 (Pa)	功率 (Kw)	备注
2607	16600	10800	90	前三排固定篦床供风
2608	16600	12500	90	后三排固定篦床供风
2609	20000	9600	90	粗料侧鱼刺充气梁供风
2612	20000	9600	90	细料侧鱼刺充气梁供风
2613	26200	7800	90	一室供风
2610	32300	7300	110	二室供风
2611	50700	6900	160	三室供风
2614	23100	5300	55	四室供风
2615	49000	5586	110	五室供风
2616	30900	5980	55	六室供风
2617	20200	3200	30	七室供风
合计	305600		970	

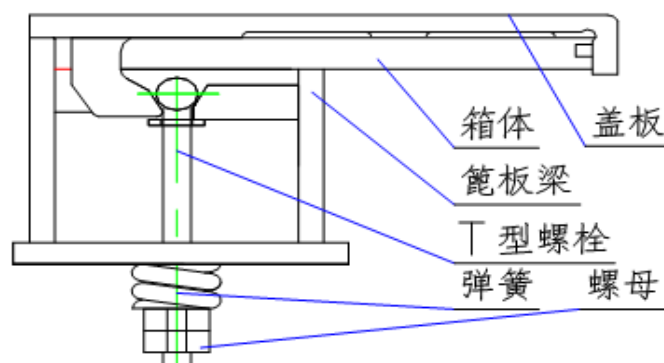


图 2 篦板固定方式示意图

3 改造方案

(1) 将固定端篦床重新划分供风区域，分成中心区供风和周边区域供风的结构形式（中间的 12 块篦板为中心区域，其余的为周边区域），重新制作供风管道。

(2) 拆除一段篦床所有篦板梁，一室篦板梁全部更换为充气梁结构，二、三

室固定篦板梁更换为充气梁结构，活动篦板梁更换为风室供风结构，一段篦床布置见图 3。

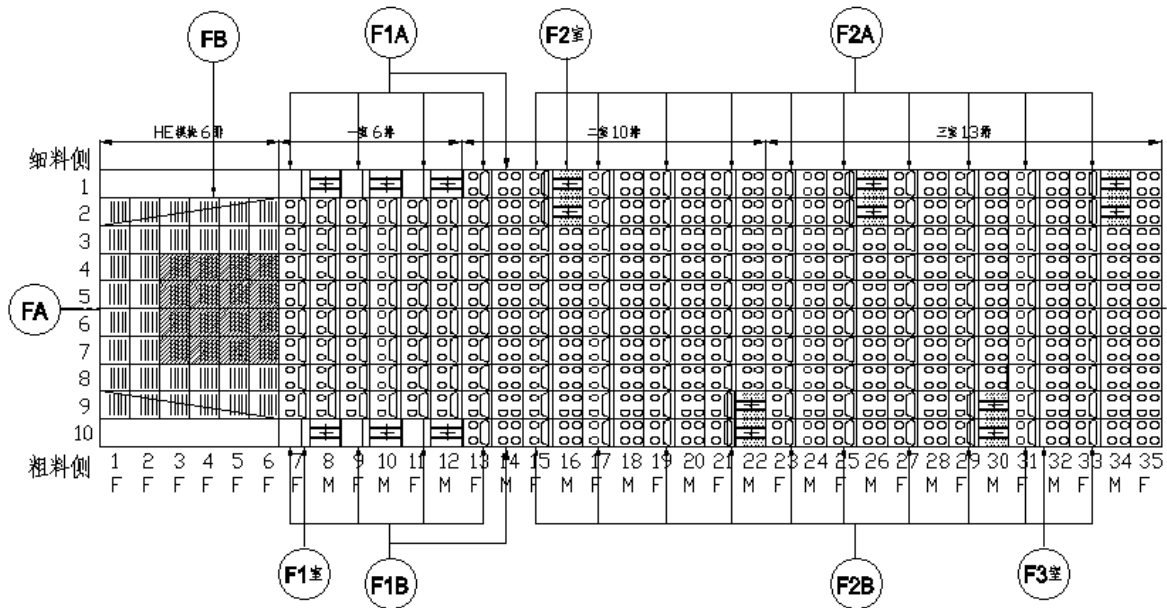


图 3 一段篦床布置图

(3) 将二段篦床前段（四、五风室）所有篦板及篦板梁更换成新的结构，固定篦板梁更换为“鱼刺”充气供风结构，提高两侧熟料的冷却效果，六、七两室不动，仍采用原来的结构。

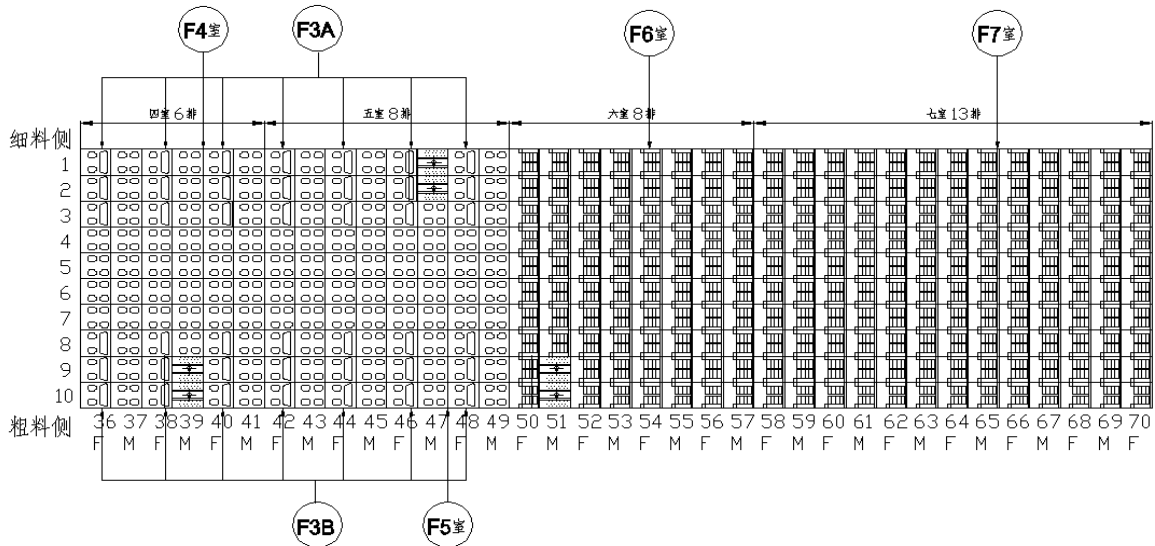


图 4 二段篦床布置图

(4) 充气梁篦板采用 NCFG（如图 5 所示）篦板形式，与篦板梁采用三点螺栓连接方式，风室供风篦板更换为合肥院 NCAG 槽型篦板结构，与篦板梁采用三点螺

栓连接方式。NCFG 篦板及 NCAG 篦板优点如下：

- a、具有良好的穿透性，进入料层的冷却风更均匀，有利于厚料层操作，热交换充分，冷却效果好；
- b、篦板缝隙无漏料，不会堵塞充气梁及供风管道，无需经常清理管道积灰；
- c、采用整体铸造技术，连接方式可靠，杜绝掉篦板现象。



图 5 NCFG 篦板照片

(5) 将一段上壳体按改造后的窑门罩尺寸重新制作安装，并将余热发电高温取风口移至一段尾部（三室上方，重新制作，原有风管拆除），利用原有阀门，取消原有的挡风墙。

(6) 将现有 $\Phi 100/\Phi 63-140$ 型号液压缸更换成 $\Phi 110/\Phi 70-140$ 型号液压缸，降低运行时篦冷机液压缸的工作压力，解决因篦冷机运行压力高而造成的篦冷机跳停问题。

(7) 在篦床两侧增加桥板，桥板安装在活动梁上，当熟料运动到桥板处时由于阻力的作用将自动往中间集中，可以有效降低“红河”现象的产生。

(8) 调整所有篦冷机风机的配置，总风量由原来的 $305600\text{m}^3/\text{h}$ 增加到 $324000\text{m}^3/\text{h}$ ，装机功率由原来的 970Kw 增加到 1100Kw ，其中风机的风量增加较少，主要增加风机的风压，使得篦床能够做到厚料层操作，延长熟料在篦冷机内的停留时间，提高冷却效果。

4 改造效果

该项目于 2014 年 9 月 10 日开工，并于 10 月 20 日点火，合计 40 天完工，改

造后的效果如下：

(1) 改造后由于提高了风机压头，一段篦床料层厚度由原来的 600~700mm 增加到了 800~900mm，一段篦床的推动次数由原来的 10 次/分钟降低到了 8 次/分钟，二段篦床篦速由原来的 12 次/分钟降低到 10 次/分钟，延长了熟料在篦冷机内的停留时间。

(2) 篦板固定方式的改变，彻底消除了掉篦板的隐患。

(3) 更换了新型的液压缸后，在正常生产料层较以前厚 200mm 的情况下，液压缸推动压力仍只有 5~7MPa，满足厚料层操作的要求。

(4) 改造前后篦冷机参数经过标定，数据变化对比见表 2。

表 2 篦式冷却机改造前后对比表

指 标	改造前	改造后
冷却熟料能力	3100~3200t/d	3500t/d
标煤耗	107.7kg/t-cl	106.6kg/t-cl
二次风温	1050℃	1101℃
三次风温	780℃	1022℃
平均出料温度	180~200℃	142℃
热效率	54.04%	64.55%
单位面积产量	47.2t/m ² d	51.7t/m ² d
单位熟料冷却用风量	1.863Nm ³ /kg-cl	1.842Nm ³ /kg-cl
运转率	85~90%	98~100%

5 结束语

此次改造篦冷机大幅提升了三次风温及产量，热回收率提高了 10%左右，熟料标煤耗节约了 1.1 kg/t-cl，取得了预期的改造效果，但是改造后出料温度仍然略高，这是因为受到篦床面积的制约，同时由于篦冷机实际产量较原设计产量增加了 500t/d，篦床单位面积负荷由改造前的 47.2t/m²d 增加到 51.7t/m²d，篦床负荷过大，导致出料温度较高，同时部分风机的电流利用率偏低，导致风机做功不足，影响熟料的冷却效果，在后续改进中可以通过调整部分做功不足风机的叶轮来提高风机的做功效果，从而进一步降低熟料的出料温度。

生物质锅炉烟气治理方式探讨

廖玉云

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

1 前言

我国生物质能源丰富,受日趋严重的大气污染和资源压力影响,作为清洁燃料之一的生物质能源推广使用越来越广泛。生物质发电就是充分利用生物质所具有的生物质能的一种形式。

生物质燃料种类主要包括稻壳、秸秆、木屑、杂草、落叶、脱水泥饼等。燃用秸秆等生物质发电的锅炉产生的污染物包括常规污染物烟尘、SO₂和NO_x外,还存在一定浓度的HCl、重金属等非常规污染物,其排放量与燃料中S、F、Cl、N元素含量直接相关。由于生物质燃料品种多,来源杂,其污染物排放浓度并不尽相同。因此,需对其排放污染物进行净化治理。

目前,我国生物质发电污染物排放浓度尚无专门标准规定,可参考《锅炉大气污染物排放标准》GB13271-2014:使用型煤、水煤浆、煤矸石、石油焦、油页岩、生物质成型燃料等的锅炉,参照本标准中燃煤锅炉排放控制要求执行。或参考火力发电厂标准《火电厂大气污染物排放标准》GB 13223-2011:单台出力65t/h以上采用煤矸石、生物质、油页岩、石油焦等燃料的发电锅炉,参照本标准中循环流化床火力发电锅炉的污染物排放控制要求执行。

同时,吉林、天津、上海相继出台了生物质锅炉污染物排放地方标准,广东、陕西、杭州市、成都市、山东省最新锅炉污染物排放标准(征求意见稿)均含生物质锅炉排放标准。生物质锅炉排放限值要求见表1。由表中可看到,若这些标准全部实施后,其排放限值要求已达到甚至超过了目前的超低排放要求:粉尘10mg/Nm³以下,SO₂最低排放限值达到了20mg/Nm³以下(杭州市),NO_x排放限值达到了50mg/Nm³以下的要求。随着国家对大气环境治理力度的不断加大,

生物质锅炉排放限值标准会越来越严格。

表 1 生物质燃料锅炉排放限值汇总表

标准名称	颗粒物 (mg/Nm ³)	二氧化硫 (mg/Nm ³)	氮氧化物 (mg/Nm ³)
《锅炉大气污染物排放标准》GB13271-2014	30~50	200~300	200~300
火电厂大气污染物排放标准 GB13223-2011	30	100	100
上海市《锅炉大气污染物排放标准》 DB31/ 387-2018	10~20	10~20	50~150
天津市《生物质成型燃料锅炉大气污染物排放标准》 DB12/ 765-2018	20	30	150
吉林市《生物质成型燃料锅炉大气污染物排放标准》 DB22/ 2581-2016	30	50	250
广东省《锅炉大气污染物排放标准》征求意见稿	20	35~50	150~200
陕西省《锅炉大气污染物排放标准》征求意见稿	20	50	150
山东省《锅炉大气污染物排放标准》征求意见稿	10~20	50~200	100~300
杭州市《锅炉大气污染物排放标准》征求意见稿	10~20	20~50	50~150
成都市《锅炉大气污染物排放标准》征求意见稿	20~30	30~50	150~200

目前由于国内各地生物质燃料质量参差不齐、缺乏专用燃烧设备以及现有锅炉改造不规范等情况，导致大部分地区生物质锅炉存在污染物排放成分复杂、浓度高等问题。随着生物质能源在国家总能源使用比例的增加，生物质锅炉燃烧排放的大气污染物已逐渐成为我国重要的大气污染源。

2 生物质锅炉燃料特点

(1) 入厂燃料种类繁多。入厂燃料一般有树皮、稻草、麦草、玉米杆、树枝、木屑等。由于热值不一样，燃烧起来特性也不一样，而生物质锅炉的入炉燃料多以混合料的形式为主，主要以人工方式掺配，因此，入炉燃料的燃料品种比例随时都在变化，很不稳定。

(2) 燃料水分高。生物质锅炉实际运行中入炉混合料的水分均在 20~45%左右，燃料中的水分偏大，刚进入炉膛中不易着火，且低温处易形成腐蚀。

(3) 杂质较多。一旦燃料入场把关不严或稍有松懈，就会在燃料中掺有泥土、细沙，这些细颗粒的物体进入到炉膛中在燃烧后随烟气流，易在锅炉烟气流速较快部位形成局部磨损。

(4) 灰分高、碱金属等含量高。生物质燃料燃烧后产生灰量大，灰比重较轻，灰分中碱金属含量高。料仓不能存较高的料位，否则会发生料仓卡堵。

3 生物质锅炉烟气治理方式选择

对生物质锅炉大气污染物进行治理设计时，应充分结合生物质锅炉燃料和烟气特点进行选择合适的治理方案。

3.1 生物质锅炉除尘治理

结合生物质锅炉出口烟气温度及灰分大的特点，其除尘治理一般选择路线为旋风收尘器预除尘——布袋除尘器进一步除尘至达标排放。在布袋除尘器前面采用旋风收尘器，一来可以降低烟气温度，二来可以分离有引燃条件的大颗粒物，同时减少布袋的除尘量，提高使用寿命。

同时，布袋除尘器灰斗设足够的电加热装置或设启动锅炉，以解决启炉期间温度太低而阻力太高，引风机出力不足的问题。

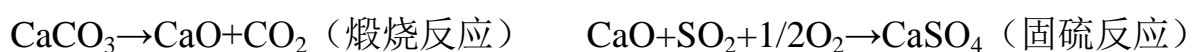
同时，若污染物中酸性气体偏高，布袋材质可选用 PTFE 等材质，以抵抗酸腐蚀，延长使用寿命。

3.2 生物质锅炉脱硫方式选择

生物质燃烧产生的 SO_2 主要来源于燃料中有机硫的氧化和硫酸盐的热分解，与生物质燃料品种有关。目前，为降低 SO_x 的排放指标，生物质发电厂可采用的脱硫技术包括：炉内脱硫、炉后干法脱硫、半干法脱硫以及湿法脱硫等，各种方法各有优缺点。

(1) 炉内石灰石脱硫

炉内石灰石脱硫技术是通过向炉内直接添加石灰石粉来控制 SO_2 的排放。投入炉内的石灰石在 850°C 左右条件下发生煅烧反应生成氧化钙，然后氧化钙、 SO_2 和氧气经过一系列化学反应，最终生成硫酸钙，化学反应式为：

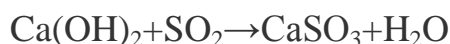


国内燃煤流化床锅炉炉内脱硫效率一般达 60%，生物质循环流化床锅炉炉内喷钙脱硫的效率比传统燃煤循环流化床锅炉低，大约在 50% 左右。甚至更低，要

获得更高的脱硫效率。需考虑炉后脱硫。

(2) 炉后干法脱硫

炉后干法脱硫可采用碱性吸收剂喷射,在锅炉出口后端合适位置增加碱性吸收剂粉喷射口,使其与烟气中的 SO_2 发生化学反应,如:



干法脱硫效率可达到 65% 以上。干法脱硫与炉内喷钙的主体设备基本一致,投资和运行费用都较低。炉后干法脱硫的缺点在于脱硫生成物与除尘器分离出的草木灰混在一起,影响肥料品质。

(3) 炉后半干法脱硫

炉后半干法脱硫最常用的工艺为旋转喷雾半干法。石灰制备系统将熟石灰制备成一定浓度的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浆液,该浆液经过旋转雾化器喷入半干式反应塔中,形成极小的雾滴。烟气与石灰浆液雾滴充分接触反应去除 SO_2 气体。部分粗颗粒在反应塔中除下,大部分微粒和未完全反应的吸收剂随烟气进入下游的袋式除尘器。

旋转喷雾半干法的脱硫效率大于 80%。半干法脱硫工艺的缺点是:设备投资成本高、占地面积大、草木灰无法利用、反应副产物需另行处理。因此该方法适用于燃料特殊,外排烟气中 SO_2 浓度高于 $300\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以上的生物质电厂。

(4) 炉后湿法脱硫

炉后湿法脱硫采用石灰石浆液或者氨水等碱性溶液与烟气接触,去除烟气中的酸性气体,同时将反应后的物质通过物理和化学过程变成副产物,主要的设备有湿式反应塔、循环浆液泵、副产物制备系统。

湿法脱硫的脱硫效率大于 90%,适用于较高浓度的烟气脱硫场合。湿法脱硫工艺的缺点是系统复杂,几乎所有设备都需防腐;投资成本高,占地面积大;排烟温度低于烟气露点温度,烟囱需要做防腐。

3.3 生物质电厂脱硝方式选择

生物质燃烧产生的 NO_x 与生物质燃料品种有关。研究表明生物质中的氮元素主要以蛋白质,游离氨基酸等有机氮的形式存在,同时还有部分无机氮。有机氮

的氧化反应会生成 NO_x。生物质电厂可采用的脱硝方式包括：SNCR 脱硝技术，SCR 脱硝技术和氧化脱硝技术等。

SNCR 技术是烟气脱硝的主流技术，脱硝成本较低，工艺较简单，但其脱硝效率较低，一般为 40~60% 左右。很难达到更高的脱硝效率。

选择性催化还原法（SCR）脱硝技术，是目前世界上烟气脱硝效率最高最有效的一种脱硝技术。在已运行的电站锅炉 SCR 装置中，脱硝率达到 80~90%，氨逃逸在 3mg/Nm³ 以下。但由于生物质燃料本身含有 K、Ca 等碱性物质，燃烧后形成飞灰进入 SCR 系统，吸附在催化剂表面，从而引起催化剂的碱中毒。

在实际烟气中的氮氧化物，90% 以上为 NO，NO 除了生成络合物以外，几乎不被水或碱液吸收，在实际应用中要达到较好的脱硝效率，可以采用氧化剂将 NO 氧化成可溶于水和碱液的 NO₂。

而氧化脱硝技术采用脱硝氧化剂氧化和吸收剂吸收的方法，利用强氧化剂将烟气中的 NO_x 氧化成水溶性的 NO₂，再利用吸收剂吸收 NO₂，最后随除尘设备一起脱除。三种技术优缺点总结见表 2：

表 2 不同脱硝工艺技术比较

技术名称	技术优点	脱硝效率	不足之处
SNCR 脱硝	烟气脱硝的主流技术，脱硝成本较低，工艺较简单。	正常情况下可以达到 40~60%	由于生物质锅炉热值低，炉膛温度不高（一般 850℃ 以下），难以获得较高的脱硝效率
SCR 脱硝	烟气脱硝效率最高最有效的一种脱硝技术	脱硝率可达到 80~90%，	生燃烧碱性飞灰吸附在催化剂表面，易引起催化剂中毒。
氧化脱硝	在较低温度下可获得较高的脱硝效率	可达 50~80%	需探索成熟的氧化脱硝剂。

4 结论

（1）目前国内尚未出台生物质锅炉大气污染排放标准，结合地方标准排放限值要求，未来排放标准提高是趋势。

（2）需结合生物质锅炉燃料燃烧特点选择除尘脱硫脱硝方式。

骑辊式辊压机电动进料装置原理及应用

高霖

(中建材(合肥)粉体科技装备有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 前言

辊压机由于高效节能的特点在矿渣、钢渣、水泥生料、铁矿石、铝矿、陶瓷粉磨等环节中得到大量应用,更成为国内水泥粉磨工序的标配装备^[1]。其进料装置是辊压机的重要组成部分,主要功能是将稳流称重仓的物料导入辊压机的工作辊缝中,进料装置的使用和调整会影响物料通过量、料床的稳定性,并间接影响辊压机的粉碎效率。进料装置调节不灵活会造成一系列问题,诸如,辊子左右料流大小变化,导致辊缝左右宽度不稳定、压力不平衡,甚至要通过棒阀来控制喂料^[2],系统经常因左右辊缝偏差大而保护跳停^[3]。早期的辊压机多采用左右对称的手动调节的斜插式进料装置,随着进料装置的作用越来越受到用户的重视,近些年出现了多种电动调节的进料装置,虽然相比早期产品有了很大的改进,结构形式也多种多样,但目前市场上的很多进料装置仍然存在边缘漏料控制不理想、设备检修维护不便、磨损辊压机辊子端面等共性问题。

1 骑辊式辊压机电动进料装置

JLSF 系列辊压机电动进料装置的一个主要特点是采用骑辊式双层侧挡板(专利号:2014201626215)解决了辊压机的边缘漏料问题(见图 1)。该双层侧挡板的内层骑在辊压机两辊子端部的上方,底部制作成圆弧形,与辊面的形状相对应贴合并控制在很小的缝隙,辊压机受挤压的物料很难从缝隙中逃逸;该侧挡板的外层位于辊子的端面,控制从内层板泄露的物料流出方向,防止物料冲刷轴承座和防尘罩;侧挡板外部装有顶紧装置,可调节侧挡板外层与辊子端面的距离以及内层骑在辊面上的位置。侧挡板内外层均采用耐磨材料制作。

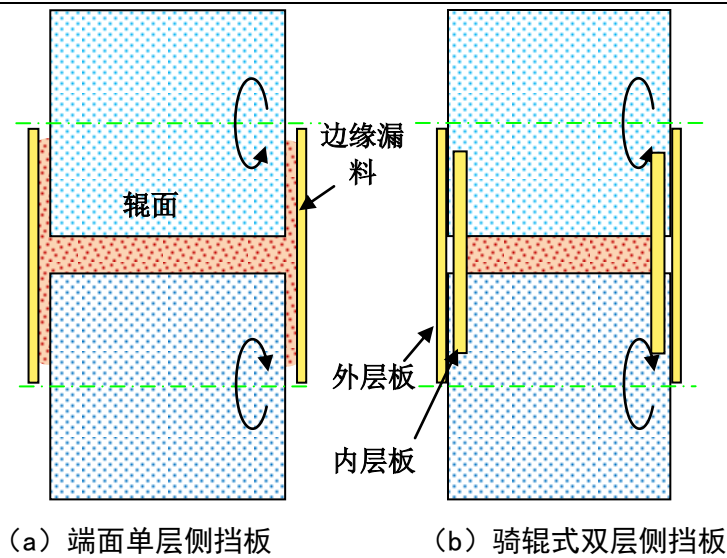


图 1 两种辊压机侧挡板结构

与传统的安装在辊子端面的单层侧挡板相比，这种骑辊式侧挡板具有以下几个方面的显著的优点或特点：

(1) 减少边缘漏料，提高粉碎效率。

其设计原理决定了骑辊式侧挡板必然大幅减少辊压机的边缘漏料，对现场的使用情况进行观察，可以发现，采用常规布置在辊子端面的单层侧挡板时，会有大量的物料从侧挡板和辊子端面的缝隙中喷出，见图 2 (a)，边缘漏料量占辊压机通过量的百分之二十甚至更多；而采用骑辊式的双层侧挡板后，运行时辊子的端面已经完全观察不到漏料，见图 2 (b)。



(a) 辊子端面单层侧挡板
边缘有漏料



(b) 骑辊式双层侧挡板观
察不到边缘漏料

图 2. 两种不同侧挡板的应用效果

从理论上讲，辊压机的边缘效应主要是因为边缘漏料的存在，造成辊压机边缘的物料受到的挤压力低于辊子中心物料受到的挤压力，从而使得辊压机有效挤压物料的宽度减小，降低了粉碎效率。骑辊式侧挡板的设计，从根本上解决了辊压机边缘漏料问题，使物料在辊压机内部形成一个密实的受压料层，从而在基本原理上提高了辊压机的粉碎效率。

(2) 提高侧挡板寿命，杜绝辊子端面磨损。

采用常规布置在辊子端面的单层侧挡板时，由于侧挡板受顶杆压紧，漏出的物料同时摩擦侧挡板和辊子端面，造成侧挡板寿命短，长期使用后辊子的端面可以被磨削数公分的深度，需要堆焊才能修复。而采用骑辊式侧挡板时，物料不与侧挡板和辊子端面的正面进行摩擦，因此大幅提高了侧挡板的使用寿命，同时也杜绝了辊子端面的磨损。

(3) 减小系统负荷，节能增产。

由于减少了辊压机的边缘漏料，对整个粉磨系统的运行带来一系列的改善效果：料饼提升机的负荷降低，设备磨损下降，尤其是选粉设备由于物料处理量的减少带来选粉效率提升和电耗的下降。对于辊压机配机械筛分的系统来说，由于经过辊压机的物料都经过了充分挤压，易磨性得到了改善，可以对入磨的物料适当放粗并提高系统产量。

(4) 进料装置采用中心下料，两边采用对称的杠杆式调节阀板。该结构简单可靠，运转灵活。

(5) 阀板开度调节方便。阀板采用非侵入式电动执行器驱动，可采用现场手动按钮控制或遥控器控制，也可以将信号接入中控，直接在中控给定开度信号即可。原则上阀板可以完全闭合，为操作安全起见，开度最小时，两阀板建议保留 20 毫米的距离。

(6) 易损件均可单独更换，例如调节阀板耐磨部采用螺栓与基板连接，调节阀板耐磨部磨损后，只需卸下螺栓更换耐磨部即可，而无需更换整个阀板；侧挡板易磨损的部位也采用了类似的设计。

(7) 进料装置非常人性化的考虑检修维护操作，不仅进料装置本身零部件更换方便，即使在堆焊维修辊面时，也不需移走进料装置，而仅仅移开进料装置上的两块盖板即可。

2 应用案例

骑辊式电动进料装置自开发以来，在大量厂家进行了应用，并对不同厂家的辊压机进料装置进行了改造替换。现收集整理了部分厂家的应用情况。

(1) A 公司水泥磨采用 HFCG160-140 辊压机并配置了早期双边斜插式电动进料装置，其原料中细粉含量较多，由于进料装置调整操作不灵活，常通过调节手动棒阀开度来防止冲料，长期操作造成辊面磨损不均匀，工人工作量大。该厂于 2016 年 10 月对 1#线辊压机进行技改，采用新式骑辊进料装置，并对系统进行优化调整。技改后，手动棒阀全部打开，辊压机电流上升，波动幅度减小，系统产量亦有明显提升。

表 1. 合肥东华建材有限责任公司改造前后对比

序号	项目	改造前	改造后
1	台产 t/h	179.6	207.9
2	电耗 kWh/t	26.38	23.80

(2) B 公司是黑龙江省目前最大的水泥生产企业，现有两条日产 5000 吨水泥熟料生产线、五条水泥粉磨生产线。水泥粉磨生产线采用 HFCG140-80 辊压机+SF600/140 打散分级机，并配以 $\varnothing 4.2\text{m} \times 13\text{m}$ 闭路磨系统，其辊压机进料装置是传统双边斜插手动调节的，控制不便，辊缝偏差大，还容易发生冲料。2017 年 3 月该厂对其辊压机进行技术改造采用了最新的骑辊式进料装置，改造后，辊压机电流上升，辊缝偏差减小，产量由 153.9t/h 提高到 168t/h。尽管辊压机液压系统压力降低了，但是入磨物料更细，系统产量更高，说明解决了辊压机边缘漏料后，物料都经过充分挤压，设备粉碎效率提高了。改造前后系统数据对比见表 2。

(3) C 公司的 HFCG160-120 辊压机原采用早期双边斜插的电动进料装置，操作不顺畅，无法实现完全关闭，2017 年 6 月进行改造，采用新型骑辊式电动进料装置。2017 年 6 月 17 日，C 公司完成了 1#辊压机下料装置的安装和调试，通过

连续运行验证，辊压机下料装置运行稳定，料饼提升机电流较原来下降 30A，解决了辊压机边缘漏料，辊压机做功明显提升，运行电流稳定在 41-52A 之间，42.5 等级水泥台时提高约 5 吨。解决了岗位人员长期使用棒阀控制辊压机通过量的问题，既降低了员工的劳动强度，又杜绝了安全风险。

表 2. 合肥东华建材有限责任公司改造前后对比

序号	项目	改造前	改造后
1	系统台产 t/h	153.9	168
2	台产电耗 kWh/t	33	31
3	产品比表 m ³ /kg	320-340	320-340
4	产品细度	R ₄₅ <22% R ₈₀ <2.5%	R ₄₅ <12% R ₈₀ <1.5%
8	辊压机电流 A	定辊 21, 动辊 22	定辊 28, 动辊 28
9	辊压机压力 MPa	10	9
10	辊缝偏差 mm	15-40	5-10

3 结论

骑辊式辊压机电动进料装置大幅减少了辊压机的边缘漏料，使得经过辊压机的物料都经过高压充分挤压，提高了设备的粉碎效率；避免了物料对辊子端面和侧挡板正面的高压力摩擦，杜绝了辊子端面磨损，延长了侧挡板使用寿命；同时，边缘漏料的减少带来料饼提升机和选粉设备负荷的降低，有助于提高选粉精度，减少磨损降低能耗。

进料装置的合理配置和使用对辊压机设备的运行稳定和粉磨效率都至关重要，但是具体能增产节电多少，不能一概而论，针对每个厂不同的工况，需要摸索出合适的运行参数，才能最大化发挥设备的运转潜能。

参考文献：

- [1] 段玉震, 王素玲, 张光宇. 辊压机的应用及改进[J]. 矿山机械, 1997(10).
- [2] 孟祥伦, 邵宝龙, 赵强. 辊压机进料装置的改造[J]. 四川水泥, 2016(5).
- [3] 陈杰, 邓亮, 李军科. CLF180-120 型辊压机进料装置改造经验[J]. 水泥, 2017(4).

大直径预应力混凝土筒仓设计与经济性分析

蒋守锋

(中建材(合肥)粉体科技装备有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 前言

随着水泥行业单线产能的扩大, 工程中要求配置的筒仓也越来越大, 单仓储量甚至要求 10 万吨以上。大直径钢筋混凝土筒仓结构计算时, 仓壁厚度和环向(主要受力)钢筋配置基本上由裂缝(而非强度)控制, 而预应力混凝土结构具有良好的抗裂性能, 同时能够大幅减少普通钢筋用量、降低施工难度, 所以大直径的筒仓最先引进预应力技术。目前预应力技术在国内外的的大直径混凝土筒仓中应用已经相当广泛, 规范^[1]第 3.3.10 条文说明:“多年来的实践证明, 直径大于、等于 21m 尤其是储料重力密度大并按裂缝控制配筋的深仓或浅仓, 采用钢筋混凝土结构, 设计和施工很难满足要求, 故本条规定应根据不同的贮料工艺采用预应力或部分预应力结构。”但未对预应力结构的经济性做出评价, 且条文中对预应力结构的计算规定不够明确和细致, 本文以水泥工业中直径 60m、储量为 10 万吨的熟料筒仓为例, 结合相关规范和文献, 进行预应力混凝土结构设计及经济性分析, 进一步探讨预应力混凝土结构的必要性和经济性, 供相关专业人员参考。

1 预应力仓壁计算

本工程案例为安徽省合肥市某水泥厂熟料储存库, 库内径 60m, 库总高 40m(局部超过 50m), 库底标高±0.000m, 混凝土库壁料位高 18.740m, 料锥高 18.746m, 几何参数如图 1 所示。熟料重力密度 $\gamma = 16\text{KN/m}^3$, 内摩擦角 $\varphi = 33^\circ$, 堆料休止角 $\beta = 32^\circ$, 仓壁厚度暂定为 600mm。混凝土强度等级为 C40, 砼抗拉强度标准值 $f_{tk} = 2.39\text{N/mm}^2$, $E_c = 3.25 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, $f_{cu} = 40 \text{ N/mm}^2$; 仓壁普通钢筋为 HRB400 级。

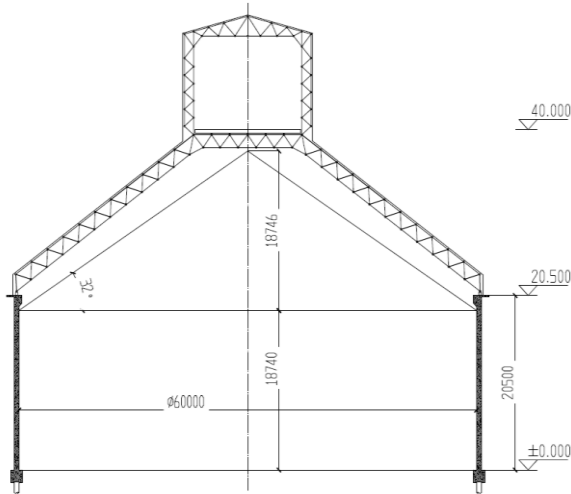


图1 筒仓几何参数图

1.1 仓壁侧压力计算

1.1.1 侧压力系数 k 计算

根据规范^[1]4.2.6条第5款：“ $h_n \leq 0.5d_n$ ， $d_n \geq 24m$ 的大型浅圆仓仓壁上水平压力 P_n (kPa) 的计算应计入仓壁顶面以上堆料的作用，可按附录 C 计算。”参考文献^[7]，计算过程如下：

(1) 由(C.0.1-1)计算 θ ，记为 $\theta_1 = 33.73^\circ$

$$\cot \theta = -\cot \varnothing + \frac{\sqrt{2[1+\cos 2\varnothing + \sin 2\varnothing(\tan \beta + 6\delta)]}}{\sin 2\varnothing} \quad (\text{C.0.1-1})$$

(2) 由(C.0.3-6)计算 $\theta_0 = 37.39^\circ$

$$\cot \theta_0 = 2\delta + \tan \beta \quad (\text{C.0.3-6})$$

(3) 因 $\theta_1 < \theta_0$ ，属工况 C.0.3，按(C.0.3-1)计算 θ ，记为 $\theta_c = 48.61^\circ$

$$\tan(\theta + \beta) = -\tan \varphi + \sqrt{(\tan \varphi + \cot \varphi)(\tan \varphi + \tan \beta)} \quad (\text{C.0.3-1})$$

下标 c 表示与 Coulomb 理论对应的破裂角。因 $\theta_c > \theta_0$ ，取 $\theta = \theta_0$ ，将 θ_0 代入

$$\eta_2 = 1 - \frac{1}{3}(2\delta + \tan \beta) \tan \theta \quad (\text{C.0.3-5})$$

计算修正系数 $\eta_2 = 0.667$ 。

(4) 最终求得侧压力系数 $k = 0.383$ 。

1.1.2 储料作用与仓壁上的侧压力计算

计算截面单位面积的水平拉力 $P_{hk} = k\gamma h$ ，此处 h 为从混凝土库壁料位标高

18.740m 起算的计算高度。尚应根据规范^[1]4.1.1 条第 1 款规定考虑温度作用，库壁环向拉力扩大 8%，即 $P_{hk}=1.08 \times k\gamma h$ ，计算结果详见表 1。

1.2 仓壁预应力设计

1.2.1 预应力筋的选用和张拉方案的确定

(1) 壁柱的设置。锚固点的数量及预应力筋的平面包角应根据筒仓直径大小确定，包角不宜小于 180° 或 120° ，对直径 22.5~60m 的筒仓，一般设置 3~6 个壁柱。

(2) 预应力筋的要求。无粘结预应力钢绞线应符合《规范》^[2]的要求。预应力筋一般不超过 60m 总长；当小于 25m 时，采用一端张拉；当大于 25m 时，采用两端张拉；预应力筋采用集束布置，每束预应力筋 4~12 根，预应力筋一般布置在库壁中心靠外侧 1/3 左右处且保护层厚度不小于 50mm。要根据仓壁的受力情况布筋，并尽量减少锚具的型号及数量，锚具应符合规范^[3]的要求。

(3) 本例预应力筋的选用和张拉方案的确定。本例选用 $\phi^s 15.2(1 \times 7)$ 的钢绞线 1860 级 ($f_{ptk}=1860\text{N/mm}^2$, $f_{py}=1320\text{N/mm}^2$)。张拉控制应力取： $\sigma_{con}=0.75 \times 1860=1395\text{N/mm}^2$ 。本工程设置 6 个扶壁柱，采用两端张拉，预应力筋包角 120° ，预应力筋采用抛物线型布置，锚具选用夹片式锚具，张拉时混凝土强度应达到设计值的 100%。预应力筋应自下而上在一定范围内间隔张拉，然后自上而下完成全部张拉。

1.2.2 预应力损失和有效预应力计算

(1) 锚具变形及钢筋内缩损失 σ_{11} 。根据规范^[4]10.2.3 条及附录 J 第 J.0.3 条计算。

(2) 预应力筋与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失值 σ_{12} 。根据规范^[4]10.2.3 条及附录 J 第 J.0.3 条计算。

(3) 预应力筋的应力松弛引起的预应力损失值 σ_{14} 。根据规范^[4]10.2.1 条表 10.2.1 计算。

(4) 混凝土的收缩和徐变引起的预应力损失值 σ_{15} 。根据规范^[4]10.2.5 条计算。

(5) 螺旋预应力筋损失值 σ_{16} 。根据《规范》^[4]10.2.1 条表 10.2.1 计算，螺

旋预应力筋的直径 $d=30.4 \times 2=60.8\text{mm} > 3\text{m}$, $\sigma_{16}=0$ 。

(6) 分批张拉时, 后批张拉预应力筋所产生的混凝土弹性压缩对先批张拉预应力的影响, 根据《规范》^[1]6.8.16 条规定: “可将先批张拉控制应力值 σ_{con} 增加 $0.05f_{\text{ptk}}$ ”

第一批损失 σ_{I} : 张拉端: $\sigma_{\text{I}}=\sigma_{11}$; 跨中点: $\sigma_{\text{I}}=\sigma_{12}$;

两端张拉, 平均预应力损失: $\sigma_{\text{I}}=(2 \times \sigma_{11}+\sigma_{12}) / 3$;

第一阶段有效预应力: $\sigma_{\text{pe1}}=\sigma_{\text{con}}-\sigma_{\text{I}}$ 。

第二批损失 σ_{II} : $\sigma_{\text{II}}=\sigma_{14}+\sigma_{15}+\sigma_{16}$ 。

(7) 有效预应力计算。两端张拉的总损失 $\sigma_{\text{总}}=\sigma_{\text{I}}+\sigma_{\text{II}}$; 无粘结预应力筋的有效预应力 $\sigma_{\text{pe}}=\sigma_{\text{con}}-\sigma_{\text{总}}$ 。

上述计算结果详见表 1。

表 1 仓壁内力及预应力计算结果

计算位置高度 H(m)		第一段 ±0.0~4.0	第二段 4.0~8.0	第三段 8.0~12.0	第四段 12.0~16.0	第五段 16.0~20.5
库壁厚度 (mm)		600				
库壁最大拉力标准 N_{tk} (KN)		3720.77	2926.59	2132.40	1338.21	544.02
第一批预应力 损失 (N/mm ²)	σ_{11}	194.60				
	σ_{12}	277.26				
第一批损失后的平均有效初始应力 σ_{pe1} (N/mm ²)		1172.85	1172.85	1172.85	1172.85	1172.85
第二批预应力 损失 (N/mm ²)	σ_{14}	48.83				
	σ_{15}	114.38	99.06	87.98	78.19	66.18
第二批损失后的平均有效初始应力 σ_{pe2} (N/mm ²)		1009.64	1024.96	1036.04	1045.83	1057.85

1.2.3 仓壁厚度复核

根据规范^[1]6.8.21 条, 不含钢筋 (普通钢筋) 保护层的壁厚:

$$t = \frac{d_n p h \sigma_{\text{pe1}}}{1.2 \sigma_{\text{pe1}} f_c} = 60 \times 1.3 \times 114.84 \times 1172.85 / (1.2 \times 1000.75 \times 19.1) = 458\text{mm}$$

考虑仓壁保护层厚度内侧 30mm, 外侧 40mm, 则 $t \geq 458+30+40=528\text{mm}$ 。仓壁厚度实取 600mm, 满足要求。

1.2.4 仓壁预应力配筋计算

(1) 非预应力环向配筋。按规范^[1]构造要求配置。

(2) 预应力环向配筋。应满足规范^[1]5.3.4条关于预应力强度比的规定：“预应力混凝土筒仓仓壁的预应力强度比，应根据仓壁的受力条件、结构特点、贮料特性、使用工况、裂缝控制等级及抗震设防烈度等选择。”此条款对强度比做出了定义，但控制指标并未给出明确的数值，在此参照规范^[6]附录C的规定，预应力强度比不宜大于0.75。

(3) 截面环向强度验算。按照 $A_s \times f_y + A_p \times f_{py} \geq 1.3 \times N_{tk}$ 验算。

篇幅有限，计算过程不一列出，仓壁预应力计算结果详见表2。

表2 仓壁预应力配筋计算

计算位置高度 H(m)		第一段 ±0.0~4.0	第二段 4.0~8.0	第三段 8.0~12.0	第四段 12.0~16.0	第五段 16.0~20.5
截面特征数据	A_c (mm ²)	592545	593361	595108	595586	596158
	A_n (mm ²)	618322	619138	614441	614919	615491
	A_0 (mm ²)	637922	633838	624941	622555	619691
	I_n (mm ²)	2.12E+10	2.12E+10	2.04E+10	2.04E+10	2.04E+10
非预应力环向钢筋	钢筋直径(mm)	20	20	20	20	20
	间距(mm)	150	150	200	200	200
	面积 A_s (mm ² /m)	4189	4189	3142	3142	3142
	配筋率 ρ_s (%)	0.70	0.70	0.52	0.52	0.52
无粘结预应力钢绞线 1860级, $\phi_s 15.2$	每束根数	7	7	5	5	3
	间距 (mm)	300	400	400	550	600
	面积 A_p (mm ² /m)	3267	2450	1750	1273	700
	配筋率 ρ_p (%)	0.54	0.41	0.29	0.21	0.12
	总配筋率 ρ (%)	1.21	1.07	0.80	0.72	0.62
	N_{p1} (KN)	3813.30	2873.47	2052.48	1492.71	820.99
	σ_{pcI} (N/mm ²)	8.01	6.00	4.35	3.16	1.74
	$\sigma_{pcI} \leq 0.5f_{cu}'$	满足	满足	满足	满足	满足
	N_{p2} (KN)	2819.04	2096.23	1536.68	1085.43	532.60
	σ_{pcII} (N/mm ²)	5.53	4.06	3.04	2.11	0.96
预应力强度比	$\gamma \leq 0.75$	0.74	0.68	0.67	0.60	0.45
		满足	满足	满足	满足	满足
环向强度验算	$A_s * f_y + A_p * f_{py}$ (KN)	5819.96	4741.96	3440.97	2810.97	2054.97
	$\geq 1.3N_{tk}$	满足	满足	满足	满足	满足
库壁抗裂验算	σ_{ctk} (N/mm ²)	5.83	4.62	3.41	2.15	0.88
	σ_{ctq} (N/mm ²)	4.67	3.69	2.73	1.72	0.7
	$\sigma_{ctk} - \sigma_{pcII} \leq 0.3f_{tk}$	满足	满足	满足	满足	满足
	$\sigma_{ctq} - \sigma_{pcII} \leq 0$	满足	满足	满足	满足	满足

1.2.5 仓壁次弯矩和次剪力计算和混凝土库壁强度验算

根据规范^[1]6.8.20条计算仓壁次弯矩和次剪力，再根据规范^[4]10.1.11验算施加预应力时库壁混凝土的抗压强度，计算结果详见表3。

表3 仓壁次弯矩和次剪力计算

计算位置高度 H(m)		第一段 ±0.0~4.0	第二段 4.0~8.0	第三段 8.0~12.0	第四段 12.0~16.0	第五段 16.0~20.5
筒仓竖向 钢筋	钢筋直径(mm)	20	20	20	20	20
	间距(mm)	200	200	200	200	200
	面积 A_{sv} (mm ² /m)	3142	3142	3142	3142	3142
	配筋率 ρ_v (%)	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
次弯矩 $M_{max,y}=F/4\beta$ (KN*m)		4452.34	4452.34	3180.24	3180.24	1908.15
单位长度次弯矩 (KN*m/m)		23.62	23.62	16.87	16.87	10.12
竖向配筋 面积	$A_{sv}=M/(0.9F_y*h_0)$	130.18	130.18	92.99	92.99	55.79
	小于构造面积	满足	满足	满足	满足	满足
次剪力 $V_{max,y}=F/2$ (KN)		2734.20	2734.20	1953.00	1953.00	1171.80
单位长度次剪力 (KN/m)		14.51	14.51	10.36	10.36	6.22
$V < 0.7f_t b h_0$		满足	满足	满足	满足	满足
施加预应力时混 凝土抗压验算	σ_{cc}	1.59	2.89	3.97	5.57	7.37
	$\sigma_{cc} < 0.75f_c$	满足	满足	满足	满足	满足

2 钢筋混凝土结构仓壁计算

因本文篇幅有限，普通钢筋混凝土结构仓壁计算过程不详细列出，各仓壁高度钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构配筋详见表4。

表4 仓壁计算结果

计算位置高度 H(m)	钢筋混凝土结构 (mm)		预应力混凝土结构 (mm)		
	普通钢筋	壁厚	普通钢筋	预应力钢绞线	壁厚
±0.00~4.00	4C28@90	700	2C20@150	7 $\phi^{s15.2}$ @300	600
4.00~8.00	4C25@100	700	2C20@150	7 $\phi^{s15.2}$ @400	600
8.00~12.00	3C25@100	700	2C20@200	5 $\phi^{s15.2}$ @400	600
12.00~16.00	2C25@125	700	2C20@200	5 $\phi^{s15.2}$ @550	600
16.00~20.50	2C20@200	700	2C20@200	3 $\phi^{s15.2}$ @600	600

3 经济性分析

3.1 主要经济指标

查询安徽合肥 2018 年 09 月信息价(除税),按照《安徽省建筑工程计价定额》(2018 版)计算各分项工程全费用综合单价,相关结果详见表 5。

表 5 材料信息价及全费用综合单价

分项工程	螺纹钢(元/t)	钢绞线(元/t)	仓壁混凝土(元/m ³)	
			C35	C40
材料信息价	4094.48	5629.51	532.69	557.73
综合单价	5837.80	13546.64	1303.20	1333.64

3.2 造价对比

因篇幅有限,本工程工程量计算过程不详细列出,计算结果对比详见表 6。

表 6 造价对比

序号	结构方案	仓壁环向钢筋工程量(t)		仓壁混凝土工程量(m ³)	仓壁造价(万元)		
		普通钢筋	钢绞线		混凝土	环向钢筋	合计
方案 1	钢筋混凝土	537.10	/	2825.00	368.16	313.55	681.71
方案 2	预应力混凝土	129.63	88.40	2576.00	343.55	195.43	538.98

4 结语

综上所述,不难得出以下结论:

(1) 混凝土部分的造价比钢筋混凝土方案降低约 6.7%,这是因为虽然预应力混凝土方案可以降低仓壁壁厚,但由于增设张拉扶壁柱,导致混凝土工程量相差不多。

(2) 库壁采用预应力混凝土结构可以大幅降低普通钢筋的配置,仓壁环向钢筋的造价相比普通钢筋混凝土结构降幅可达 37.7%左右。

(3) 预应力混凝土结构有较好的经济性,同时又具有良好的抗裂性能。既节约了造价,又提高了结构的安全性与耐久性,同时可消除因钢筋密集引起的混凝

土与钢筋的粘结不够而导致的质量隐患。

(4) 规范^[1]已实施多年, 未与规范^[4] ^[5]等主要规范同步更新, 其中关于预应力计算的相关规定不够明确, 存在进一步细化的空间。本文结合相关规范和文献对预应力筒仓进行了结构计算, 在此呼吁新的钢筋混凝土筒仓设计规范能够对预应力结构部分更加的细化和明确。

参考文献

- [1]GB 50077-2003 钢筋混凝土筒仓设计规范.
- [2]GB/T 5224-2014 预应力混凝土用钢绞线.
- [3]GB/T 14370-2015 预应力筋用锚具、夹具和连接器.
- [4]GB 50010-2010 混凝土结构设计规范.
- [5]GB 5011-2010 (2016 年版) 建筑抗震设计规范.
- [6]JGJ 369-2016 预应力混凝土设计规范.
- [7]原方, 陈丽等. 新《钢筋混凝土筒仓设计规范》附录 C 的应用[J]. 特种结构, 2004(04):42-43.
- [8]栾文彬, 周先财等. 大直径预应力混凝土筒仓的经济分析[J]. 中国水泥, 2010(02):70-71.
- [9]赵茁跃, 宋桂强等. 浅谈预应力混凝土筒仓设计[J]. 水泥工程, 2011(03):10-13.

HRM 型全外循环生料立式磨及其粉磨系统的研究与应用

熊会军

(合肥中亚建材装备有限责任公司, 安徽 合肥 230051)

1 引言

目前, 国内外水泥工业生产线在生料粉磨上主要以立式磨粉磨系统(以下简称“传统生料立式磨粉磨工艺系统”)为主流, 因立式磨是集粉磨、烘干及选粉于一体的粉磨设备, 具有粉磨效率高、操作维护方便、工艺流程简单等特点, 所以受到广大的水泥生产企业的青睐。这种立式磨粉磨系统带外循环系统一即排渣系统。不论是哪一种形式的立式磨, 在生料粉磨系统中其外循环量都不会超过喂料量的 30%, 这属于小部分物料循环。立式磨粉磨系统在生料粉磨中单机电耗基本在: 8kWh/t~11kWh/t, 而系统电耗基本维持在 14 kWh/t ~19 kWh/t 之间。不同的立式磨及粉磨系统、不同的物料导致了立式磨单机电耗及系统电耗的波动范围。这种工艺虽然比球磨机节电效果明显, 但是由于其属于风扫粉磨系统的原因, 其电耗进一步降低很困难。

在国内外水泥制造工业里, 也存在不少由辊压机+V 型选粉机(以下简称“辊压机粉磨系统”)的全外循环生料粉磨工艺系统。通过调研我们了解到辊压机粉磨系统: 在物料具有较好易磨性(物料易磨性指数 ≤ 12.5 kWh/t 时)的情况下, 辊压机粉磨系统表现出很好的粉磨效率和较低的粉磨能耗(系统能耗在 10kWh/t~14kWh/t); 在物料易磨性较差(物料易磨性指数 > 12.5 kWh/t 时)时, 辊压机粉磨系统粉磨效率和粉磨能耗将会高于传统立式磨粉磨系统。辊压机粉磨系统在物料综合水分比较大时($\geq 3\%$), 其粉磨效率将明显下降。

在水泥生产线生料粉磨上, 国内外普遍采用的传统立式磨属于风扫磨系统。在立式磨上方设有选粉机, 物料在磨内循环, 因此磨内部需要通入大量气体, 由

于要由喷嘴环高速的喷射气流将被粉磨物料带入到选粉机内，因此这种内循环立式磨系统风机消耗功率比较大；在粉磨技术高速发展的今天，其能耗指标已没有明显优势。

2 HRM 型全外循环生料立式磨系统及其单机简介

2.1 全外循环生料立式磨系统

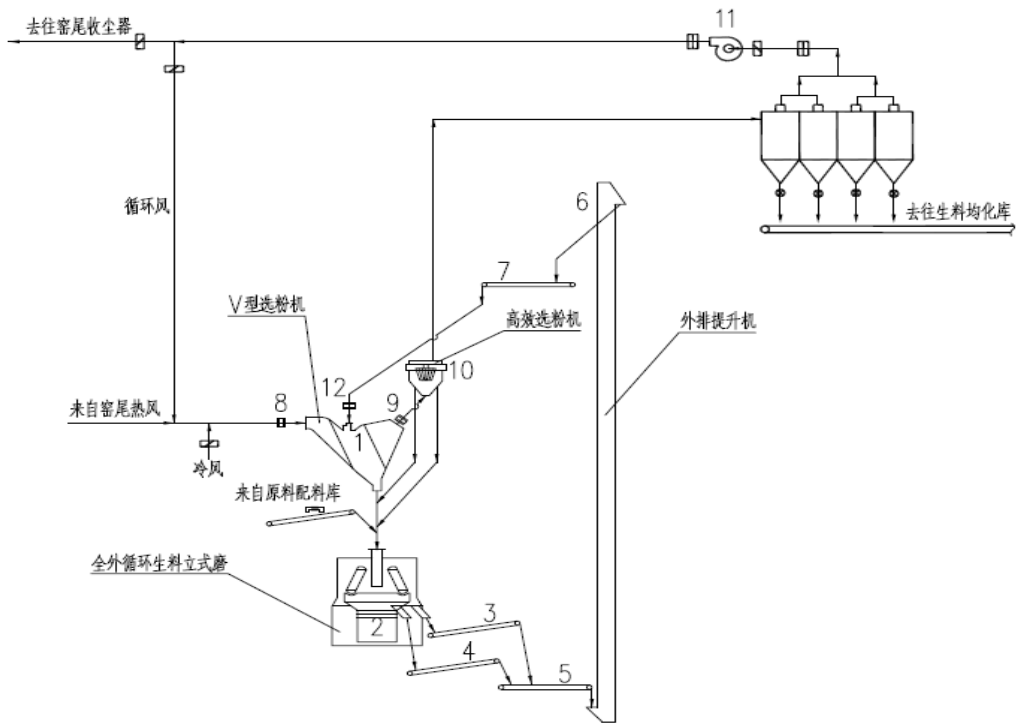


图 1 全外循环立式磨生料粉磨工艺流程图

工艺系统介绍：物料经 V 型选粉机被预烘干后进入立式磨（其中部分细粉被气流带进高效动态选粉机分选），经粉磨后全部排出到外排提升机，由提升机输送到 V 型选粉机进行第一次选粉，再经高效动态选粉机进行第二次选粉，V 型选粉机和高效动态选粉机内不能被气流带走的物料又分别重新返回立式磨内进行粉磨。

2.2 HRM 型全外循环立式磨单机简介

基本原理：生料混合料通过微机配料进入立式磨中，主电机带动减速机旋转，物料落到磨盘中央，借助离心力逐步向磨盘边缘移动，并被磨盘上的磨辊咬住，物料间相互的挤压研磨在旋转的磨盘和磨辊之间的间隙内进行。物料经高压碾压后进入刮料腔，经刮板收集后由提升机将物料送入 V 型选粉机，从 V 选出的物料

进一步通过动态选粉机进行选粉，合格品成为生料，不合格粗粉继续回立磨进行重新粉磨。

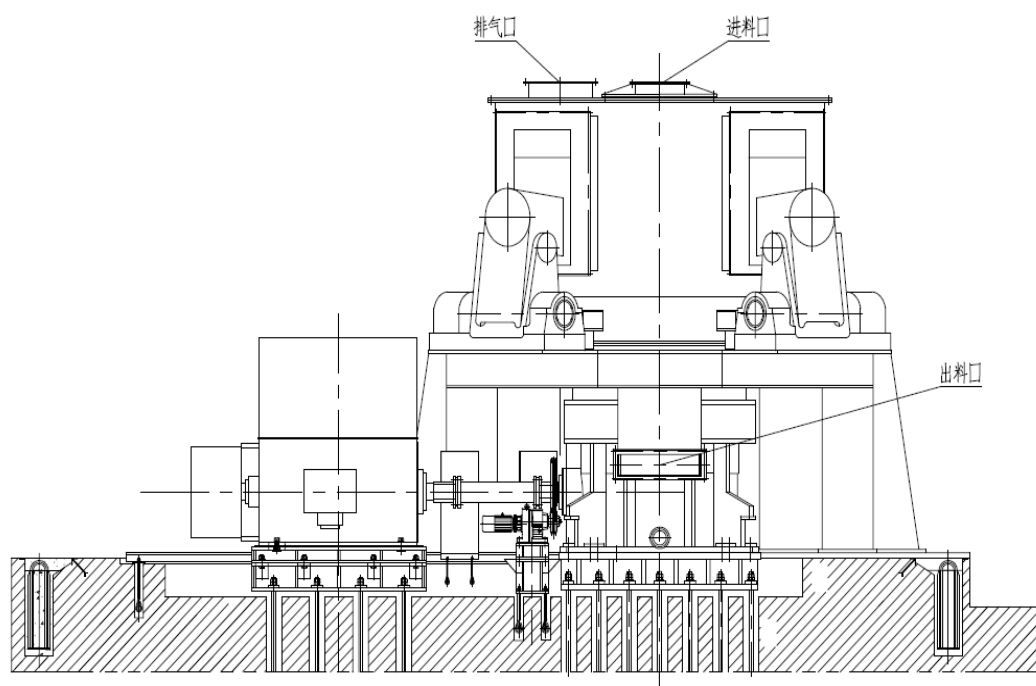


图2 全外循环立式磨

3 全外循环生料立式磨及其工艺系统研究的关键技术

(1) 根据我国机械加工能力和配套能力研究设计出原理先进、结构合理、适合我国国情大型全外循环生料立式磨。其中主要根据国产轴承和减速机的规格、液压系统的能力及尺寸，研究优化磨辊、磨盘、大型结构件等；

(2) 对于大型全外循环生料立式磨磨辊、磨盘上的耐磨材料来说，现场修复技术，不仅仅是解决生料立式磨保持良好工作状态问题，更重要的是要大幅度提高材料利用率、节约资源、降低劳动强度、提高设备及工艺系统的运转率。

(3) 研究磨盘、磨辊研磨曲率对粉磨能力、单位电耗的影响，确定最佳的研磨曲率。对磨盘座及传动臂等主要承载的大型部件进行静、动态载荷下的结构分析与计算，找出磨盘座上应力平均分配的有利于浇注工艺的最佳形状，并充分考虑热力的影响。

(4) 研究当今先进的高效组合式动态选粉机及 V 型选粉机，选择适合全外循环大型生料立式磨粉磨系统中配套的 V 型选粉机及高效组合式选粉机，并进行相

应规格选粉机的开发设计。重点考虑选粉区域部分对颗粒运动的控制，降低循环负荷，提高选粉效率。

4 全外循环生料立式磨粉磨系统的优点

(1) 与传统立式磨粉磨工艺相比，有效防止过粉磨现象同时有效降低磨机主机电耗及风机电耗；

(2) 立磨本体不带选粉机，其优势在于：首先，较传统内循环立磨而言，物料全部经过机械提升，降低了磨内物料输送功耗及系统风机功耗；其次，选粉机的外移，可根据不同的粉磨工艺进行特殊设计，有利于高效、节能选粉工艺的实施；最后，取消了磨内喷嘴环设置，大大减缓了高速含尘气流对磨辊、壳体内壁等部件的磨损。（和前面重复了）

(3) 粉磨效率更高。充分利用辊式磨料床粉磨原理，处于磨槽外侧粉磨区的物料不仅受到挤压力的作用，还受到相对速度造成的剪切力的作用，更容易使物料得到高效率的粉磨。特殊磨辊设计增大了物料的粉磨区域，配合特殊设计的衬板粉磨区（磨盘衬板），实现磨辊对物料层的均匀施压，不论是高强压缩还是剪切粉磨，都具有优异的粉磨效率。

(4) 粉磨后物料分散效果好。由于粉磨过程是剪切力和挤压力共同作用，出立磨物料呈松散状，大大降低了后续选粉工序中物料分散、分级的功耗，无需另外设置打散工序，物料在 V 选中分散均匀，选粉效率高，因此可降低选粉风量，有效降低系统风机功耗。

5 HRM 型全外循环立式磨及其工艺系统在新疆某厂的具体应用

5.1 项目背景

2017 年，新疆某厂一条 3500t/d 新型干法水泥生产线原有一台沈重的 MLS4028 原料立式磨，因系统电耗高达 23kWh/t，且磨机产能 195~210t/h 满足不了煅烧工段的要求，因此委托我公司对其进行技术改造，要求提高系统产能且降低系统电耗。通过和业主的技术交流，我们决定采用 HRM 型全外循环生料立式磨系统进行改造。



图3 新疆某厂原有MLS4028生料立式磨

5.2 技改方案

5.2.1 对原有立式磨本体的技改:

保留原有立式磨主电机（YRKK800-6 2800kW）及其稀油润滑系统、主减速机（JLP330 3150kW，速比：43.36）及其稀油润滑系统、磨盘装置（按照新设计的碾磨曲线现场对磨盘衬板进行在线修复），将原立磨分离器装置通过技改后放置于工艺系统中用作动态选粉机，对原有壳体进行现场技改，其中磨辊部分采用3只HRM型立式磨磨辊，加压限位装置及液压装置单独设计。



图4 技改施工和运行四个月后的现场图片

5.2.2 对原有立式磨工艺系统的技改:

现场原有立式磨粉磨系统为传统的生料立式磨粉磨系统，其工艺流程图如下，技改后工艺流程图如文中图 1 所示，其中 V 型选粉机直接架在立式磨机上，将原有的外排提升机由 NE100X32.3m 改换成 NSE1500X32.5m（双传动型），原有磨机上分离器装置外移改造成动态选粉机并同 V 型选粉机相连，系统循环风机风量 550000m³/h（全压 11000Pa，装机功率 2500kW）改造成风量 420000m³/h（全压 7000Pa，装机功率 1400kW）。

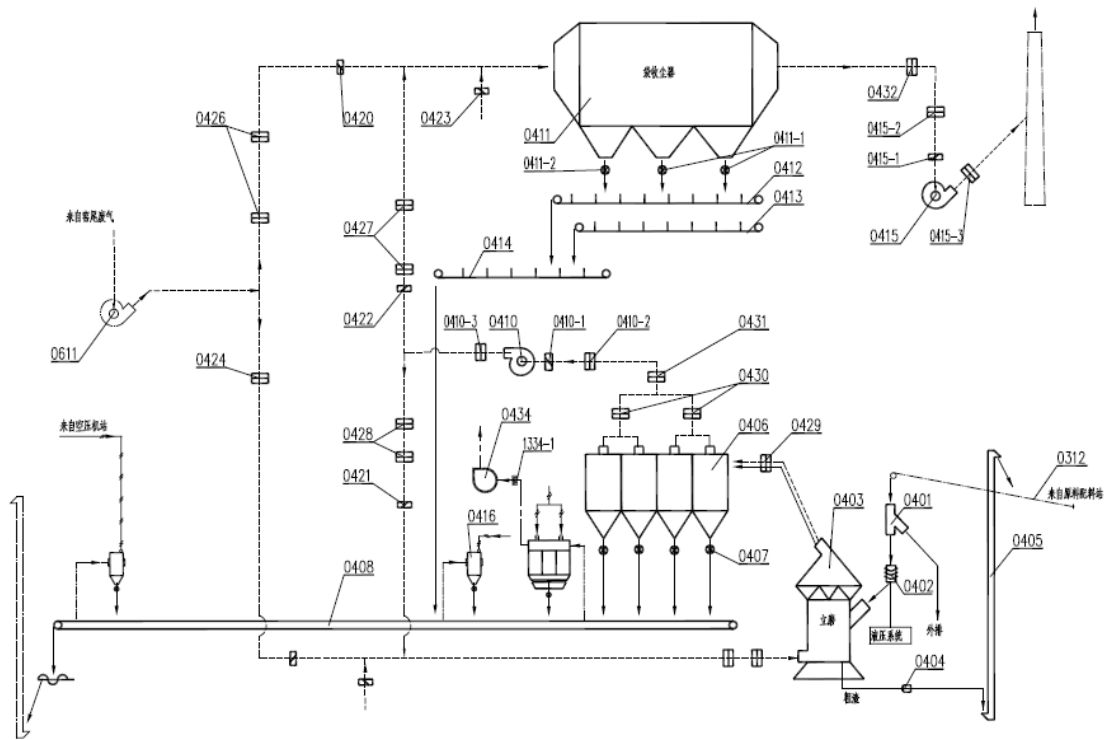


图 5：原有传统生料立式磨粉磨工艺流程图

5.3 技改前后数据（参数均为五个月的平均值）

表 1 新疆某厂技改前后粉磨系统相关参数对比表

	系统产能 (t/h)	生料细度 (R0.08mm)	立磨单机电 耗(kWh/t)	立磨磨辊压 力(MPa)	系统风机单机 电耗(kWh/t)	生料系统电 耗(kWh/t)
技改前 (传统生料立式 磨系统)	195~210	≤26%	11~13	12	11~13	23~26
技改后 (全外循环生料 立式磨系统)	235~245	≤18%	8~9.5	14	6~7	14~17

参数说明:

(1) 立磨产能受磨盘转速影响较大, 原始磨机磨盘转速为 22.9r/min, 在未改变此转速的情况下, 整个系统的产能发挥受到限制。

(2) 生料系统电耗统计范围是从配料皮带到入库提升机, 不含尾排风机电耗。

6 结语

在水泥产能严重过剩的今天, 未来将很少新建水泥生产线, 并且国内水泥行业将对生产线节能降耗有着越来越严格要求; 节能降耗是本文研究对象的根本宗旨, 所以将本文研究对象利用在对已有的传统立式磨粉磨系统中进行技术升级改造, 对水泥行业的节能减排有着非常重要的意义, 对我们制造企业自身, 则会带动产值的提升。该技术的应用成功, 将在水泥行业拥有广阔的市场。

参考文献:

- [1] 张庆今 《硅酸盐工业机械及设备》, 华南理工大学出版社, 1992
- [2] 张志宇 《HRM 型立式磨技术特点及应用》 粉磨技术

基于 SC-TETRA 的混料机混合效果数值模拟对比研究

朱守刚 杨勇

(中建材(合肥)机电工程技术有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

过去人们通常采用宏观实验的方法对成品水泥混合均匀度进行研究,传统的实验方法对粉料混合的均匀度没有标准的评价方法,实验数据无法对混料机的混料效果做出真实的评价,也无法得到混料机内部物料混合的即时信息和颗粒的运动信息。现有数值模拟研究混合均匀度仅适用于小流量粉体混合设备^[1,2],对工业级别大流量和超大流量的粉料混合设备的数值模拟研究较少,对固定容器立式混合设备的数字模拟也尚未出现,对气固两相流的数值模拟着重于小流量和颗粒体积比分小于12%的稀相流研究,这就使得人们很难更好地开发和设计效率更高的工业大流量混料机器。本文采用工业级颗粒相变混合仿真软件SC-TETRA对现有水泥厂使用较多的两种混料设备——双轴卧式混料机和组合式混料机分别进行工业级颗粒数值模拟。采用混合后混合料中颗粒的体积比分来衡量混料效果。

1 多相流模型

1.1 多相流模型选择

目前工程应用中对多相流的描述模型主要有三种^[3]:

(1) 连续介质模型。此类模型将颗粒相看成是拟流体,模型对颗粒、流体皆采用欧拉坐标,即欧拉—欧拉模型。

(2) 离散颗粒模型。此类模型将颗粒看作是离散相,而气相仍然被视为连续相,此模型可以跟踪所有颗粒的运动轨迹,也常被称为颗粒轨道模型。这类模型对颗粒相采用拉格朗日坐标,而对流体采用欧拉坐标,即欧拉—拉格朗日模型。

(3) 流体拟颗粒模型。这类模型对流体、颗粒的运动都是采用拉格朗日坐标描述。

本文将颗粒作为是离散相、气流作为连续相，选择欧拉-拉格朗日模型来完成颗粒混合过程的数值模拟，跟踪所有颗粒的运动轨迹。

1.2 多相流模型建立

SC-TETRA软件中的稠密离散相模型DDPM模型，其中连续相的数学描述采用欧拉法，用N-S方程（纳维-斯托克斯方程）求解流动性，得到速度等参量；离散相采用拉格朗日方法描述，用牛顿第二定律跟踪求解流场中的每一个离散粒子的运动轨迹积分运算得到其运动轨迹。

组合式混料机的前两级机械混料和卧式混料机物料进入设备后，不同混合料颗粒堆积在一起，形成了堆积密度，远大于颗粒体积分数的12%，SC-TETRA提供了稠密离散相模型DDPM来对此进行模拟，其控制方程如式（1）和式（2）所示：

$$\frac{\partial(\alpha_p \rho_p)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{u}_p) = \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha_p \rho_p \vec{u}_p)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{u}_p \vec{u}_p) = -\alpha_p \nabla p + \nabla \cdot [\alpha_p \mu_p (\nabla \vec{u}_p + \nabla \vec{u}_p^T)] + \sum_{q=1}^n \left(\vec{K}_{qp} \left(\vec{u}_q - \vec{u}_p \right) + \dot{m}_{qp} \vec{u}_{qp} - \dot{m}_{pq} \vec{u}_{pq} \right) + K_{DPM} \left(\vec{u}_{DPM} - \vec{u}_p \right) \quad (2)$$

式中： α_p 为颗粒体积分数， ρ_p 为颗粒密度， \vec{u}_p 为颗粒速度， \dot{m}_{qp} 为由q相到p相的质量传递， \dot{m}_{pq} 为p相到q相的质量传递， $F_{vm, lift, user}$ 代表提升力、虚拟质量力等附加作用力， \vec{K}_{qp} 为由q相到p相的动量交换系数， K_{DPM} 为离散相之间的动量交换系数^[4, 5]。

1.3 颗粒运动方程

在SC-TETRA中离散相颗粒的运动轨道是通过积分拉氏坐标系下的颗粒作用力微分方程来求解的，颗粒的作用力平衡方程（颗粒惯性=作用在颗粒上的各种力）在笛卡尔坐标系下的形式（x方向）如式（3）所示：

$$\frac{d u_p}{d t} = F_D (u - u_p) + \frac{g_x(\rho_x - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3)$$

式中： F_x 为其他作用力； $F_D (u - u_p)$ 为颗粒的单位质量曳力； u 为流体相速度； u_p 为颗粒速度； ρ 为流体密度； ρ_p 为颗粒密度^[6-8]。

在旋转参考坐标系下，式（3）中的 F_x 还包括由于旋转引起的作用力，定义围绕 z 轴旋转，在笛卡尔坐标系下， x 和 y 轴方向的附加作用力为式（4）和式（5）所示：

$$F_x = (1 - \frac{\rho}{\rho_p})\Omega^2 x + 2\Omega(\mu_{y,p} - \frac{\rho}{\rho_p}\mu_y) \quad (4)$$

$$F_y = (1 - \frac{\rho}{\rho_p})\Omega^2 y + 2\Omega(\mu_{x,p} - \frac{\rho}{\rho_p}\mu_x) \quad (5)$$

其中 $\mu_{y,p}$ 和 μ_y 分别是颗粒与流体在 y 轴方向的速度， $\mu_{x,p}$ 和 μ_x 分别是颗粒与流体在 x 轴方向的速度。

2 数值模拟

2.1 几何模型建立

卧式混料机几何模型如图 1 所示。组合式混料机为容器固定式混合设备，呈立式安装，混料机模型经过简化后几何模型如图 2 所示。

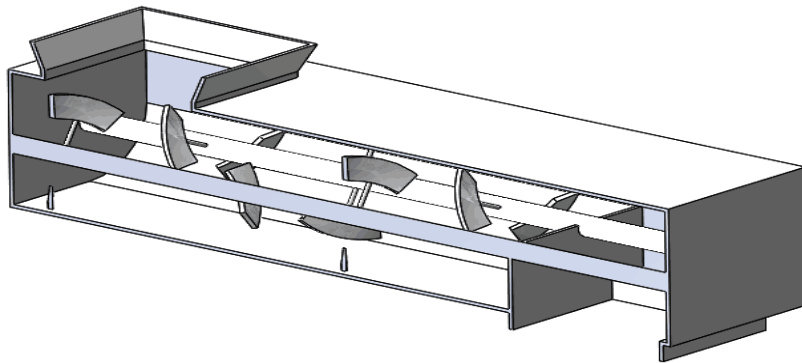


图 1 卧式混料机几何模型

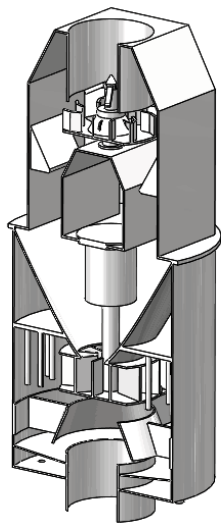


图 2 组合式混料机几何模型

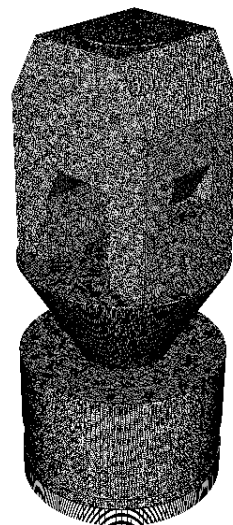


图 3 组合式混料机数值模拟模型

2.2 数值模拟模型及网格划分

本文将组合式混料机模型的旋转区域进行分离，将气力均化室等同为多孔介质层，将得到多孔介质上表面流体信息作为颗粒混合工况中的气体入口边界条件进行计算，因此上述模型分为 4 个部分，一级机械旋转域、二级机械旋转域、气力均化室设置为多孔介质域和其余物料流通域，两级机械混料各自独立运动，组合式混料机数值模型如图 3 所示。

把整个卧式混料机模型分为 3 个部分，主轴 A 旋转域、主轴 B 旋转域、箱体下部充气室设置为多孔介质域和其余物料流通域，使用滑移网格对不同的域使用相同大小的网格划分。卧式混料机数值模型如图 4 所示。

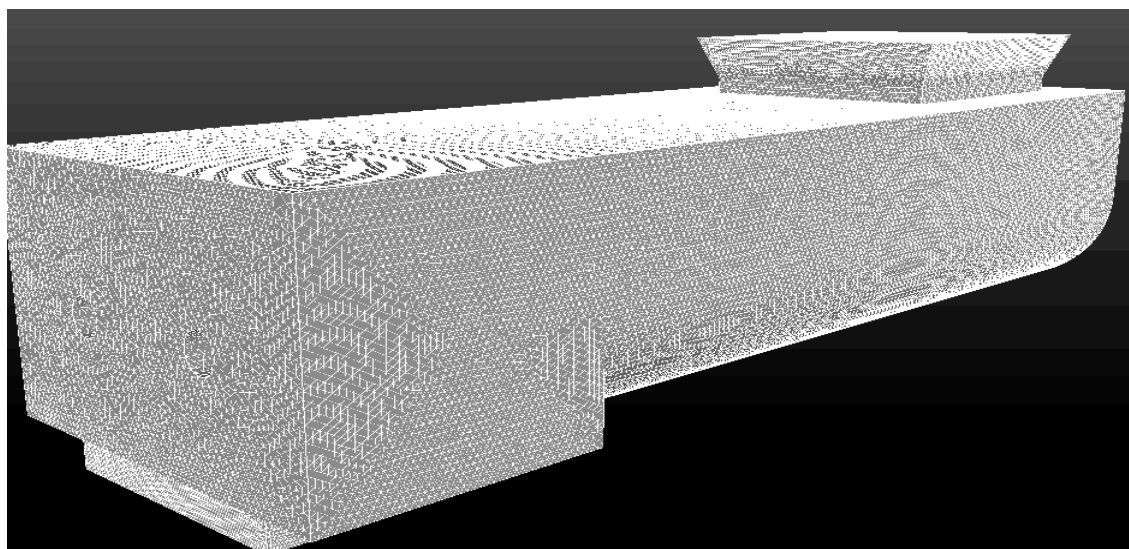


图 4 卧式混料机数值模拟模型

2.3 边界条件

结合水泥工业现场实际情况，本文仿真的原料使用水泥熟料和矿渣粉颗粒，两者的进料比例为 7:3，颗粒部分使用 *DDPM* 密相离散相模型，箱体下充气部分使用 *RNG k-ε* 模型，颗粒形状为球形颗粒^[9]。其中组合式混料机气力均化室设置为多孔介质替代，孔隙率为 2.5%。具体设置如表 1 所示。

表1 混料机模型参数设置及边界条件

参 数	空气	颗 粒	
		水泥熟料	矿渣粉
总进料量 (t/h)		7	3
颗粒直径 (mm)		1mm	1mm
密度 (kg/m ³)	1.225	1x10 ³	0.85x10 ³
进料颗粒数量 (个/s)		3715499	1873361
组合式混料机 一级混料盘转速 rpm	300 (逆时针)		
组合式混料机 二级混料盘转速 rpm	350 (顺时针)		
卧式混料机 主轴 I 转速 rpm	90 (逆时针)		
卧式混料机 主轴 II 转速 rpm	90 (顺时针)		
入口处料气速度 (m/s)	0.023		
卧式混料机 气力均化室进气	气管进气速度 1m/s, 气压 4000Pa		
卧式混料机 气力均化室进气	进气管速度 0.5m/s, 气压 2000Pa		

2.4 数值模拟

本文颗粒运动数值模拟进料方式为连续进料，进料量大小为表 1 中参数所示，进料时间为 5s。颗粒在组合式混料机和卧式混料机中的混合状态分别如图 5 和图 6 所示。其中红色颗粒为水泥粉颗粒，蓝色颗粒为矿渣粉颗粒，以下相同。

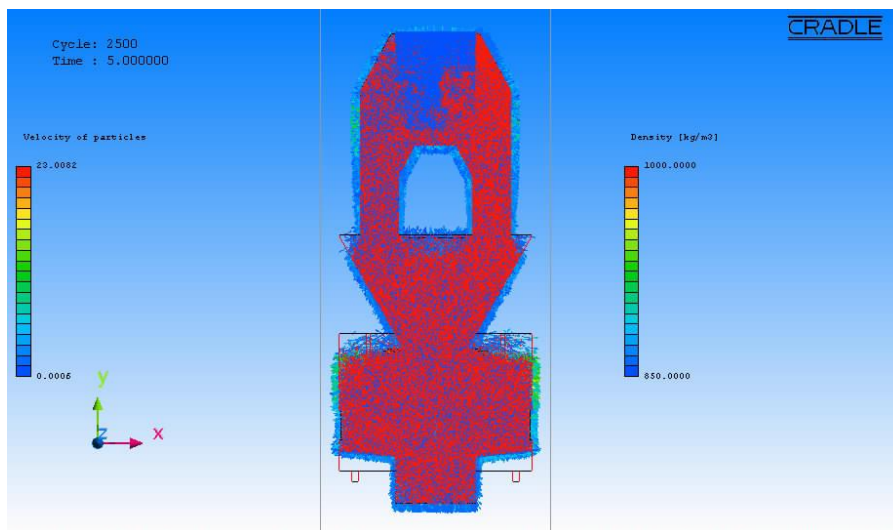


图 5 颗粒在组合式混料机中的混合状态

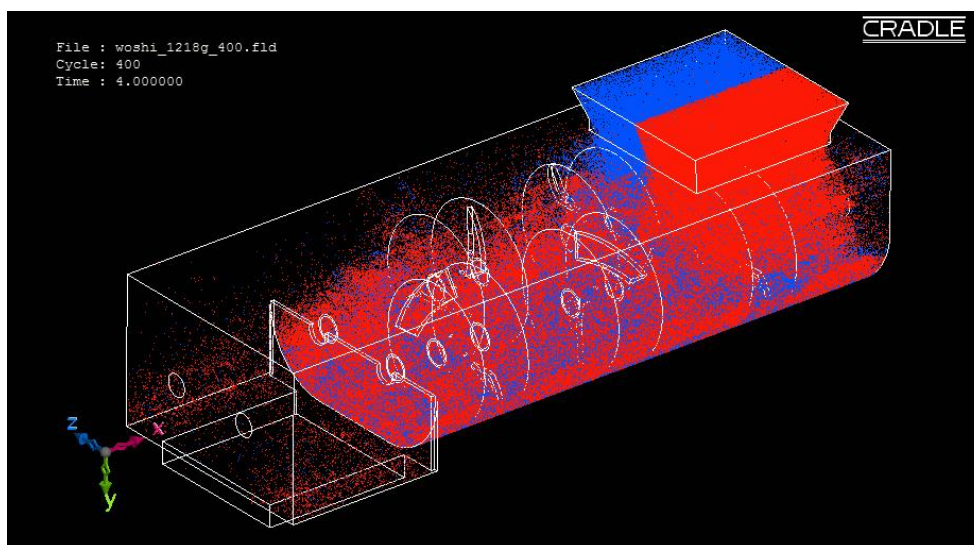


图 6 颗粒在卧式混料机中的混合状态

3 结果分析

本文混料机混料效果的评价方法是：选取出料口任一截面，将此截面分成中多个均等部分混合料颗粒样本，通过分析各个样本中的不同颗粒所占总颗粒质量分数和浓度来评价混料机的混合效果。其中标准偏差反映了统计数据与平均值的离散程度，标准偏差越小，表明混合越均匀。变异系数是标准偏差与平均数的比值，它可以消除多组数据均匀性比较时可消除因平均数不同而造成对变异程度的影响，最能比较多种物料间的均匀程度。通过经验得出数值模拟计算混合度时，变异系数小于 10%时为混合的较均匀，变异系数越小越均匀。

水泥粉颗粒和矿渣粉颗粒样本均值 \bar{X} 、样本标准偏差 $\sigma_{\bar{X}}$ 和变异系数 CV 的计算如下式。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \sigma_{\bar{X}} = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$CV = \frac{\sigma_{\bar{X}}}{\bar{X}}$$

3.1 组合式混料机混合质量分析

稳定出料后，选取如图 7 所示模拟时间第 5s 时的出料口截面作为混料效果分析的样本，出料口截面面积为 0.12m²，将此截面均等分为 12 等分，每部分面积

为 0.01m^2 ，出料口截面混合情况如图 7 所示。

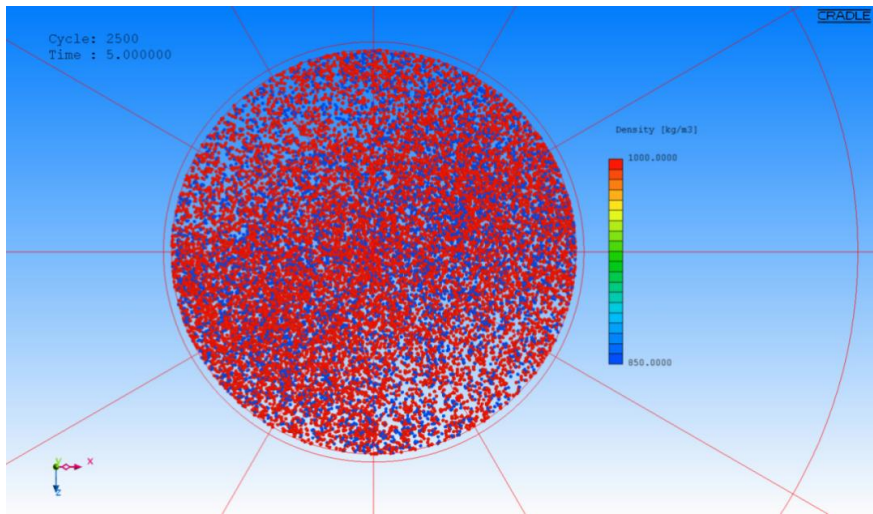


图 7 出料口截面混合情况

表2 组合式混料机样本各参数

系数	水泥粉颗粒		矿渣粉颗粒	
	数量	质量分数	数量	质量分数
样本均值	5642	0.6853	2611	0.3147
样本标准偏差	875.2832	0.059469524	683.9683	0.059469524
变异系数	0.155132	0.086760788	0.261965	0.189057668

3.2 卧式混料机混合质量分析

稳定出料后，由于混料机挡料板的存在，卧式混料机出料不能保证出料口的截面整截面出料，模拟过程第 4s 时混合料已经填满挡板，所以选取此时的挡料板截面作为混料效果分析的样本，挡料板面积为 0.11m^2 ，将此面均等分为 11 等分，各部分面积为 0.01m^2 。如图 8 所示。

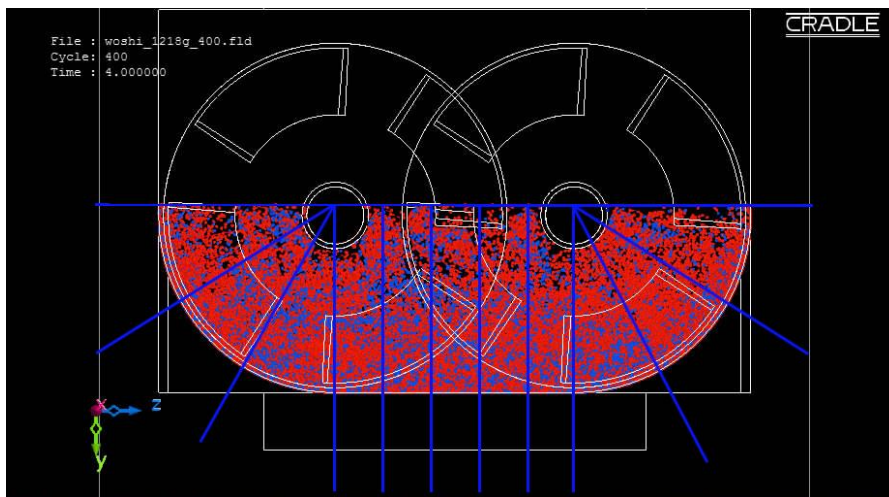


图 8 4s 时挡料板截面混合情况

表 3 卧式混料机样本各参数

系数	水泥粉颗粒		矿渣粉颗粒	
	数量	质量分数	数量	质量分数
样本均值	7191	0.706596277	2962	0.293403723
样本标准偏差	1481.88	0.051886579	728.21	0.051886579
变异系数	0.21	0.073431719	0.25	0.168613785

3.3 混合质量对比

通过对物料在两种设备中的混合过程进行数值模拟，对模拟结果进行分析和后处理后，得出在一段时间内物料在两种设备中混合过程变异系数 CV 值对比，如图 9 所示。从图中可以看出，两者的 CV 值均小于 10%，属于数值模拟混合度较好的范围，卧式混料机的 CV 值略小于组合式混料机，从理论上分析来说，CV 值越小，表明混料效果越好，混合越均匀。从实际上分析来说，由于数值模拟采用的进料量无法达到工业现场实际进料量，由于卧式混料机下部流化区域大，越小的进料量在卧式混料机中越容易得到充分的流化，对于工业大流量的进料，组合式混料机更有优势。同时在本文中，样本的选取截面不一样，卧式混料机的截面较组合式混料机小，也会对分析结果产生一定误差。

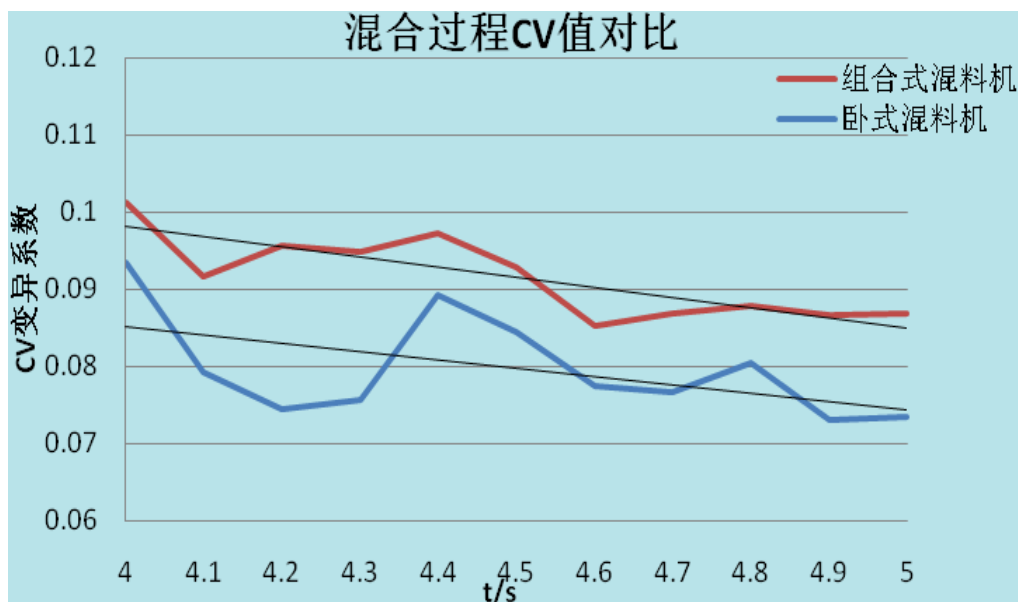


图 9 两种混料机混合过程 CV 值对比

4 存在问题

本文结合水泥工业现场最常用的两种混合物料水泥粉颗粒和矿渣粉颗粒，采用气固两相流仿真软件*SC-TETRA*对定量进料的两种颗粒在组合式和卧式混料机中的运动状态和混合过程进行了模拟，得到了颗粒在混料机内部的速度场分布和出料后混合质量分数。根据结果分析分别得出了组合式混料机和卧式混料机的混料效果。

(1) 颗粒形状

本文颗粒形状使用圆球模型，难以弥补实际颗粒形状的差异产生的偏差。圆片形或椭球形模型接触情况比较复杂，实际模拟时统一为圆球模型，需要增加的形状变异系数还需要深入研究。

(2) 分步模拟

组合式混料机和卧式混料机均存在机械旋转和气力均化部分，由于处理颗粒数量巨大，本文对气力均化和颗粒碰撞的耦合使用分开模拟的步骤，透气层用多孔介质层代替，进气对透气层布的作用效果作为后续模拟的边界条件来处理。

(3) 变异系数

混料机实际运行中，混合料颗粒在混料机中除了受自身的重力以外，还受浮力和流场的冲击，颗粒粒度小沉降速度慢，甚至不容易沉降，受流场的影响颗粒易扩散出现不规则运动。而通过数值模拟计算，颗粒直径设置为1mm，数值模拟过程只考虑颗粒的重力和流场的曳力。实际运行中颗粒混合的变异系数会远远大于数值模拟数据。

5 总结与展望

本项目对双轴卧式混料机和节能型组合式混料机（具有独立知识产权已获国家发明专利：201210243348.4）分别进行工业级颗粒数值模拟。研究表明组合式混料机混料效果优良，为组合式混料机的市场化打下理论基础。

截止目前，项目成果已累计销售30余台套。在水泥行业，本项目研究成果为混合材与熟料分别粉磨，再按不同比例调制不同品种和标号成品的“合成水泥

工艺”生产提供了原理先进、高效节能、技术可靠的新一代连续式混料设备，改写了水泥厂长期以来只能依赖卧式混料机的历史，实现相关技术与装备的更新换代，对提高我国水泥行业技术装备绿色节能现代化水平具有积极意义。对生产企业控制产品质量、提高产量和质量、淘汰落后技术以及提高自动化水平起到积极作用，有力地推动了行业技术进步。同时，由于成果的通用性和适应性强，可期在矿业、钢铁、电力、化工等领域也有广阔的市场空间。

参考文献

- [1]欧阳鸿武、何世文、陈海林、刘咏, 粉体混合技术的研究进展[J].粉末冶金技术, 2004,22:112-118.
- [2]孙其诚, 王光谦, 杨宁.水平圆筒型混合机中颗粒混合的离散模型[J].中国粉体技术, 2002,8(2):6-9.
- [3]张欣, 王文庆, 武锦涛, 等.颗粒流动模型研究进展[J].中国粉体技术, 2007,13 (6): 36-40.
- [4]袁竹林, 朱立平, 耿凡, 等.气固两相流动与数值模拟[M].南京: 东南大学出版社, 2013.
- [5]Fluent Inc.FLUENT User, s Guide[M]. Fluent Inc,2012.
- [6]卜英勇, 康新库, 吴晟.径向直叶片湿式风机内气固两相流的数值模拟[J].郑州大学学报: 工学版, 2011,32(4): 76-80.
- [7]胡桂荣, 李意民, 贾晓娜.离心风机内气固两相流的数值模拟[J].煤矿机械, 2008, 25 (29): 38-39.
- [8]潘海波, 郭宏伟, 虞维平, 等.离心除尘风机气固两相流的数值模拟[J].流体机械, 2005, 33 (6): 11-13.
- [9]王福军, 计算流体力学分析-CFD软件原理与应用[M].清华大学出版社, 2004.

钢丝胶带提升机在密相干塔 脱硫装置中的应用

袁明辉

(中建材(合肥)机电工程技术有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

“密相干塔脱硫装置”是钢厂、火电厂等企业常用于烟气脱硫的一项工程技术装置,多是在原生产厂区内新增建设的,因此其工艺设计及设备布局受到空间限制。为了在有限空间内实现吸收剂循环使用并提高循环效率,吸收剂的垂直提升是最佳选择。在早期实验及初期推广阶段,该装置先后选用板链提升机和气力提升泵,但这两种提升设备或多或少都存在一些不足,提升设备的选择一时成为该装置能否大量推广的关键。

1 提升设备在密相干法脱硫装置中的位置

1.1 密相干法脱硫装置工艺流程

密相干塔烟气脱硫的工艺流程主要包括烟气中 SO_2 的吸收和吸收剂的循环利用两个过程(如图1所示)。

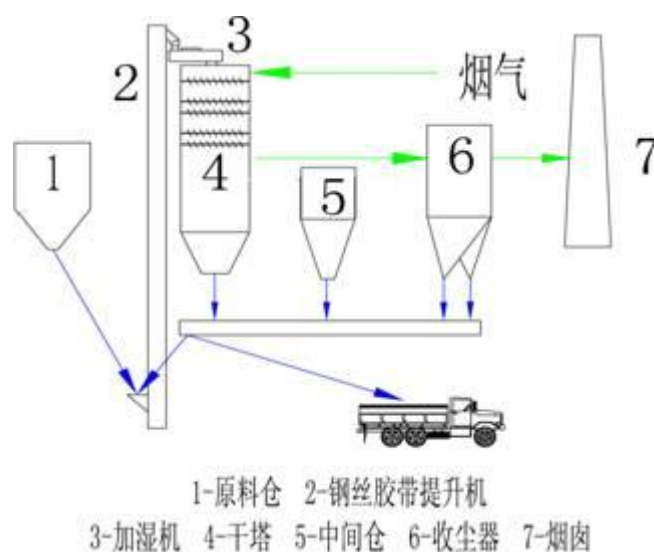


图1 密相干法脱硫装置工艺流程

(1) 烟气行程：预除尘后的含硫烟气由干塔上部入口进入干塔，在干塔内与由干塔上部连续加入的活化后的钙基吸收剂进行反应，反应后的烟气由干塔下部出口进入除尘器除尘，净化后的烟气通过烟囱排入大气。

(2) 吸收剂（输送物料）的循环利用：吸收剂的主要成分是 CaO 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaSO_4 ，吸收剂经加湿活化后进入干塔与烟气反应，反应后的吸收剂仍有活性，与收尘器收集的颗粒以及来自料仓的新吸收剂一起再次进入干塔装置实现循环利用。

1.2 提升设备在脱硫装置中的位置

在此装置中，一般采用相同规格的两台提升设备（图 1 所示设备编号 2）平行布置在干塔的一侧，其作用在于将吸收剂提升到塔顶加湿搅拌机。

1.3 既有提升设备存在的问题

既有提升设备主要是板链提升机（包括 NE 和 NSE）和气力提升泵，通过对该装备试验及初期推广阶段所涉及项目的全面调研，发现既有提升设备存在诸多问题，即使传统的钢丝胶带提升机也存在可预见的问题。

(1) 机械提升是当前粉体物料垂直输送领域的发展方向，而气力提升泵噪音大、能耗高。

(2) 板链提升机在块状物料及高温岗位有其独到的优势，但此岗位所输送的物料具有吸水易板结的特性，使得板链提升机的链条与柱销之间、链条节与节之间不能保持连接活性，加大了磨损，导致备件率及维护量大为增加。此外，由于物料流动性不良，而板链提升机运行速度较慢（一般 NE 板链提升机不超过 0.6m/s ，NSE 不超过 1.3m/s ），使得卸料过程中产生大量回料，物料在尾部堆积，不仅不能满足产量需要，严重的甚至直接埋料压死。

(3) 针对钢丝胶带提升机，可预见的最大问题在于物料温度高对轴承密封及钢丝胶带使用寿命的影响。一般烟气温度的在 $80\sim 180^\circ\text{C}$ 之间，而吸收剂循环过程中

在脱硫塔内与烟气进行热交换，这必将使吸收剂温度持续升高，现场实测连续温度达到 110℃，短时温度超过 130℃。此外，物料易板结的特性，极易导致自动纠偏机构因内置导轨集料板结而锁死。

2 胶带提升机的特殊设计及优化措施

波特兰牌钢丝胶带提升机具有自主知识产权，为了适应脱硫岗位的要求，在发挥既有的能耗低、维护量小等优势的前提下，做了很多超前性的设计和优化措施。

(1) 针对温度高的问题，我公司开发的耐热 II 型钢丝胶带适应长期物料温度 120℃，短时 150℃，瞬时最高可达 180℃。

(2) 改进尾部张紧及密封设计，有效减少胶带跑偏及尾部漏灰

a、机尾采用自平衡自动张紧设计，通过强力平行四连杆机构使尾轮两端面同步动作，尾轮始终紧贴胶带，自由平行滑动，配以整体棒状鼠笼式尾轮，以实现自动张紧和自纠偏功能。

b、采用整体内置隔断式尾部轴承座，轴承密封采用耐高温氟胶油封（耐温可达 250℃）和整体式密封盖板，使密封效果更优越。同时轴承座软隔断（图 2）有效隔开物料与轴承座、四连杆导轨件的长期接触，能有效避免尾轮导轨集料粘结以确保四连杆自动纠偏机构的灵活运动。轴承座软隔断的设计在其它磨蚀性或流动性好的物料提升岗位也有一定的应用意义。

c、鉴于工艺设计中采用侧进料方式，且输送量需根据实际多频调整，机尾进料口采用特殊设计以保证集中中心进料，有效的减少跑偏几率。

(3) 机尾加装外置密闭式跑偏开关底座（图 3），将原来复杂的跑偏报警装置进行优化，既提高了跑偏报警装置使用可靠性，也有效避免了机尾漏灰。这一设计目前已作为胶带提升机标准配置获得广泛应用。



图2 加装软隔断的轴承座



图3 新旧跑偏报警装置对比

(4) 胶带接头采用独特的连接方法和连接件，并开创性的加入接头拧紧限位块，在保证钢丝胶带接头连接强度的同时，还有效避免了过度拧紧导致的胶带接头失效。

3 应用情况

波特兰牌钢丝胶带提升机自 2009 年首次进入脱硫岗位以来已有 54 台胶带提升机在脱硫岗位投运，目前使用情况良好，主要体现在以下几点：

(1) 运行平稳，同步运转率高。输送量均达到或超过设计产量，以新近投产的迁钢为例，其最大产量 $470\text{m}^3/\text{h}$ ，正常满载运行时提升机电流波动算术平均值稳定在 2A 内，设备的同步运转率高，达到 99%以上。

(2) 维护量小。胶带提升机相较于同类提升设备本就具有维护量小的优点，在整个脱硫装置中由于物料的特殊性，各部位设备均存在不同程度的板结，但胶带提升机有效避免板结，这也使得提升机维护量小的优点显得更为突出，即使在大修期间整根更换钢丝胶带备件其操作也简单易行。

(3) 环境友好。钢丝胶带提升机运行过程中噪音低，单位电耗相比同等工况条件下的板链提升机或气力提升泵节约 30~40%。此外，提升机是整体密闭，加之提升机内部保持微负压状态，避免了跑灰和冒灰，设备现场整洁有序。

4 结语

中建材（合肥）机电工程技术有限公司生产的钢丝胶带提升机在过去的二十多年里，先后进入到水泥之外的有色、化工等新领域，在所涉足的这些领域中，其优秀的机械性能和工况适应性在面临全新的工艺和使用条件时都有着不俗的表现。当然，随之而来的还有全新的挑战，这是任何一项技术或者装备进入新行业所必须面临的，在这一情况面前，只有通过不断的技术创新，才能在新行业、新领域不断拓展，为行业的技术革新做出贡献。

参考文献

- [1] 张晓刚, 宋存义, 王亮, 周超 密相干塔技术在烧结烟气脱硫中的应用, 钢铁, 2007年42卷7期
- [2] 周啸 N-TGD 钢丝胶带提升机的研制与开发, 水泥工程, 2002年第4期
- [3] 魏铸, 李杰, 郭奇志 N-TGD 钢丝胶带提升机技术特点及其开发效益剖析, 水泥工程, 2007年第1期

基于 PCS7 的水泥粉磨控制系统的设计与应用

刘军

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

随着新型干法水泥生产技术的广泛应用, 为适应业主对水泥品质和工艺的要求, 提高水泥粉磨的效率, 立磨越来越多地被应用于水泥粉磨^[1]。

莱歇水泥磨系统测点多, 控制精细, 不仅是为了充分保护设备, 也是为了促进生产系统的高效稳定运行, 缺点是控制复杂, 专业性强, 必须有多年丰富经验的磨操才能胜任操作。^[2]

如果配合自动化控制, 就可以大大简化操作难度, 同时减少误操作, 充分保护各种设备, 强大的在线数据记录功能也可以协查故障检修。为了更好的调节与控制整个莱歇立磨系统的正常运行, 本公司设计了一套基于西门子 PCS7 V8.2 版本的、针对以莱歇立磨为核心的水泥粉磨自动化监控系统。

本公司在巴基斯坦 ATTOCK 水泥线项目中采用莱歇 LM56.3+3 CS 型水泥立磨, 并且相关粉磨系统均由莱歇公司提资设计。该型立磨使用 6 个磨辊, 包括 3 个主辊 (M 辊) 和 3 个小辊 (S 辊), M 辊和 S 辊分别用两个液压站 (HSLM 和 HSSW) 控制, M 辊负责研磨, S 辊负责铺料。另外还配有一个 M 辊润滑站、一个减速机油站、一个主电机油站、一个选粉机油站和一台中央油脂干油泵。

本文以莱歇水泥磨的控制为核心, 采用西门子 PCS7 V8.2 版本为平台, 严格遵循莱歇工程师的提资要求, 编写了一套针对莱歇立磨及配套设备的水泥磨自动化监控系统。该系统不仅继承了莱歇公司成熟的磨机操作理念, 也借鉴了业主方和合肥院多年来在生产调试过程中积累的大量经验, 尽可能地丰富了系统的功能, 在简化操作、高度自动化的同时, 具有较高的稳定性、安全性和信息化程度。

整条生产线系统共分成 6 个自动化站，采用西门子 PCS7 V8.2 版本的全集成自动化解决方案，而水泥粉磨系统是其中的一个子站，其编程集成于整条生产线项目中。

1 系统的编程

1.1 PCS7 简介

PCS7 是西门子的新一代 DCS 系统，基于过程自动化，从传感器、执行器到控制器，再到上位机，自下而上形成完整的 TIA（全集成自动化）架构。^[3]

PCS7 集成了西门子传统的 step7 和 WINCC，但又不完全等同于 step7+WINCC，其 CFC 和 SFC 组态工具在调用功能块进行编程的同时，已经根据块的功能分配于相应组织块，同时自动生成数据块、功能块。编程方式采用连线和块引脚设置的方式进行，逻辑清晰，更加容易上手。上位机软件中提供了大量的操作模板，与下位机的 CFC 和 SFC 块一一对应，在从 STEP7 到 WINCC 的编译过程中，自动形成链接。变量记录和报警记录同样也可以通过编译的方式传送到上位机。

全集成的自动化解决方案可以在一个平台下实现传统多个系统组合才能实现的一切功能，简化了系统结构并减少了系统接口部件，跨越了上位机与控制器的界限，完美地整合了自动化系统。在提高了编程效率，缩短调试时间的同时，也可以避免手动组态造成的错误，提高系统的可靠性。^[4]

1.2 硬件架构

如图 1 所示，水泥磨自动化站 AS05 采用 CPU410-5H 作为处理器，CPU 与 ET200SP 之间采用 PROFIBUS-DP 总线通讯，与远程站三台 FCS 柜通过 OLM 转换后用光纤连接。莱歇油站和热风炉各有一台专用柜，同样采用 PROFIBUS-DP 总线通讯。

自动化主站 CPU 通过以太网卡与中控服务器实现通讯，控制室 FCS 柜距离中控室较远，采用光纤连接，通过光电交换机转换信号。服务器、操作员站和工程师站之间采用 TCP/IP 协议，通过交换机在局域网内实现信息互换。

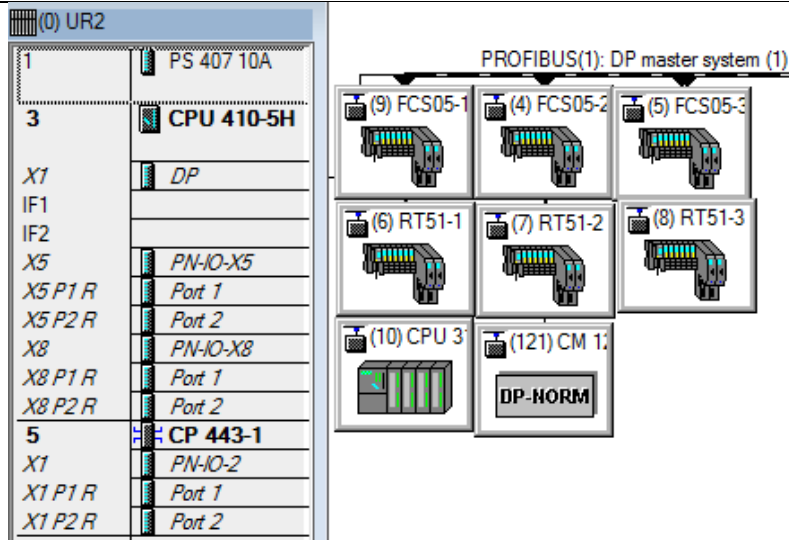


图 1 硬件组态结构示意图

2 水泥磨系统介绍

本项目采用 CFC (连续功能图) 进行组态编程, 大量调用最新 V8.2 版本 APL (高级过程库) 提供的功能块。通过编译 OS 的方式上传到对应的 WINCC 项目中。

下面通过水泥磨系统启动流程的描述, 对水泥磨系统进行说明。

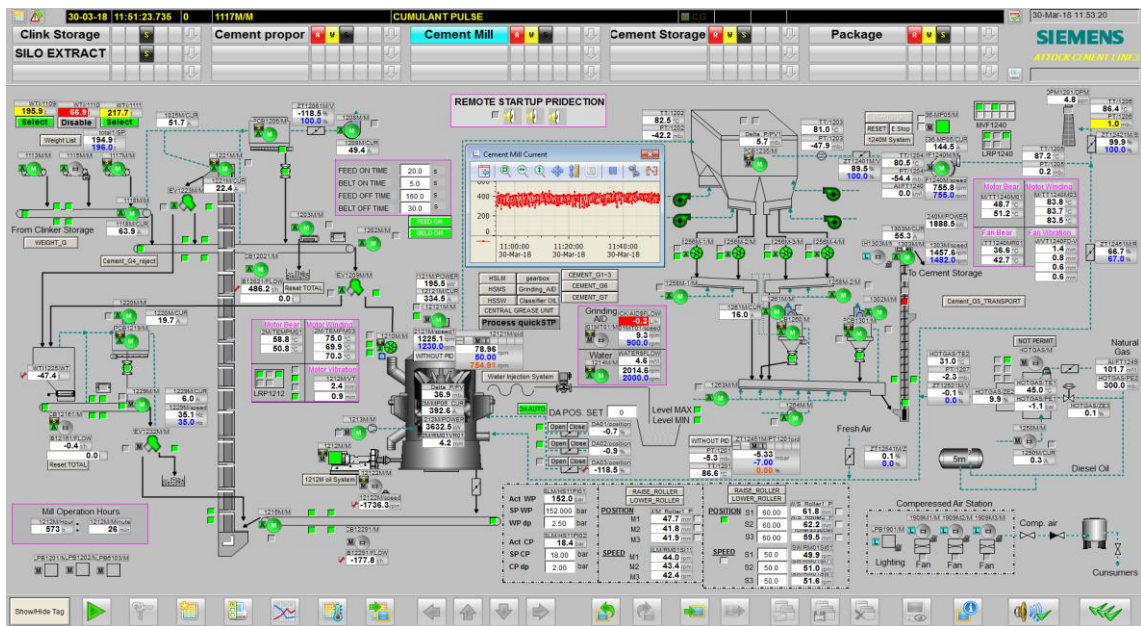


图 2 水泥磨系统主画面

2.1 水泥磨系统的启动

水泥磨系统总体分成 10 个组, 分别编上序号, 配有联锁, 按照序号的大小先后启动。

1#组为加热器组，两个液压站和主辊润滑站的加热器必须首先启动。

2#组为润滑组，磨机减速机、主电机油站和选粉机稀油泵为第二序列启动，减速机油站启动 20 分钟，且各油站监控数据均满足工作要求后，相应的设备启动联锁才能打开，允许启动。在主电机停机后，减速机油站必须继续工作 30 分钟，把设备的热量带走，才允许关闭。

3#组为液压组：M 辊、S 辊液压站，M 辊润滑站，中央油脂干油泵，选粉机干油泵启动，喷水系统激活。两台干油泵不需要一直开启，在各自的油站页面输入框内输入开启和停止的时间，系统会自动开启和关闭干油泵。4#组为回渣组：开磨之前需要把外循环设备开启，包括回渣皮带、回渣提升机，及配套的金属探测器、除铁器、三通阀、通过式皮带秤、收尘器。提升机出口的三通阀切换到回渣仓方向。

5#组为水泥入库组：从大收尘下料至入水泥成品库的所有设备在该组中启动。总共四个成品库，通过选择键确认需要入的库，三个 CP 分料阀切换到相应的位置，与被选择库相关的斜槽风机和收尘也依次启动，没有选择的则不开。

6#组为水泥磨大收尘器及其配套的下料斜槽风机，由一台配有 CPU224-CN 的专用柜进行控制。

7#组为气路循环组：①水泥磨风机控制：水泥磨风循环由一台 2500kw 的中压变频风机拉动，为了保证生产的可靠性，该电机配有一套中亚变频装置和一台备用的水阻柜。当收到变频旁路柜上传的不同状态信号时，风机将处于不同的控制模式中，分别启用对应的连锁。因功率较大，需要对变压器进行预充电，但充电后保持时间很短，收到充电完成信号后必须在 5 秒内中压开关柜就必须合闸送电，不适合人工操作，因此整个过程设置成一键启动。为了保护风机，启动电机强制低频启动，且每次加速不允许超过 50RPM。②热风炉的控制：因为研磨时要一直对料层喷水，而太多水分不利于大收尘器收尘，因此配有一台热风炉提高循环风的温度，烘干水泥成品中多余的水分，热风炉设有一台专用柜，通过 DP 通讯与

PCS7 系统交换数据。上位机可以随时监控炉膛温度、压力，鼓风机状态，各风开度，门天然气流量等数据。③天然气和水泥磨风机流量数据采集是通过差压变送器配合节流装置的方式，需要相应公式和参数进行计算

水泥磨风机风量（经典文丘利管）计算公式

$$Q = 0.00380090 \times d^2 \times \varepsilon \times \alpha \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

天然气（标准孔板）计算公式

$$Q = 0.0042863 \times d^2 \times \varepsilon \times \alpha \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

d 为工况开孔， ε 为可膨胀性系数， α 为流量系数， ΔP 是采集的压差， ρ 是操作密度^[5]

④气路循环组的启动：密封风机、选粉机首先依次启动，气路管道上四个调节阀分别一键切换到初始位置，启动水泥磨风机，在相关监控指标达到要求后，热风炉连锁解开，启动热风炉。启动水泥磨入口压力的 PI 调节器，控制循环风管调节阀稳定磨机进口压力。

8#组为主电机：当收尘器入口温度达到 80 度左右，水泥磨风机和选粉机速度逐步提升起来达到生产要求，且主电机相关联锁均满足时，启动主电机。

9#组为投料输送组：入磨分格轮、三通阀、喂料皮带及辅助设备依次打开，准备投料。

10#组为三台皮带秤，分别位于熟料，石膏和混合材三个配料库下面。通过一个配比表，以百分比的方式分配三种配料的比例，启动皮带秤投料，且当 9#、10#组所含设备均收到运行信号后，开始落辊第一个倒计时。当喂料皮带上的通过式皮带秤反馈流量达到总喂料量的 80%，开始落辊第二个倒计时，两个倒计时都计数完毕，系统自动发出落辊指令。两个倒计时的时间长短非常关键，如果落辊时

机把握不好，容易导致磨机振动，在调试的时候经过反复实际测算和调整，才最终确定这两个时间，并在画面上留有输入链接，便于日后微调。

停料也有类似的时间设定，用来把握抬辊时机。

2.2 油站系统

油站系统作为磨机控制的核心，由一台专用柜进行管理，每个油站作为一个独立单元分类控制其设备，同时与大系统交互数据，根据操作员与系统联锁的需要，进行自动控制。

油站的监控分成 7 个部分，M 辊液压站（HSLM）、S 辊液压站（HSSW）、M 辊润滑站（HSMS）、减速机油站（gearbox）、主电机油站、选粉机油站和大风机油站。

所有油站都在中控设有小画面，可以随时打开监控。每个油站设有 3 种模式：触摸屏模式、中控模式和本地模式，即根据需要可以选择专用柜，中控和机旁按钮盒来进行操作，中控画面和触摸屏都可以进行切换，但触摸屏切换需要密码。

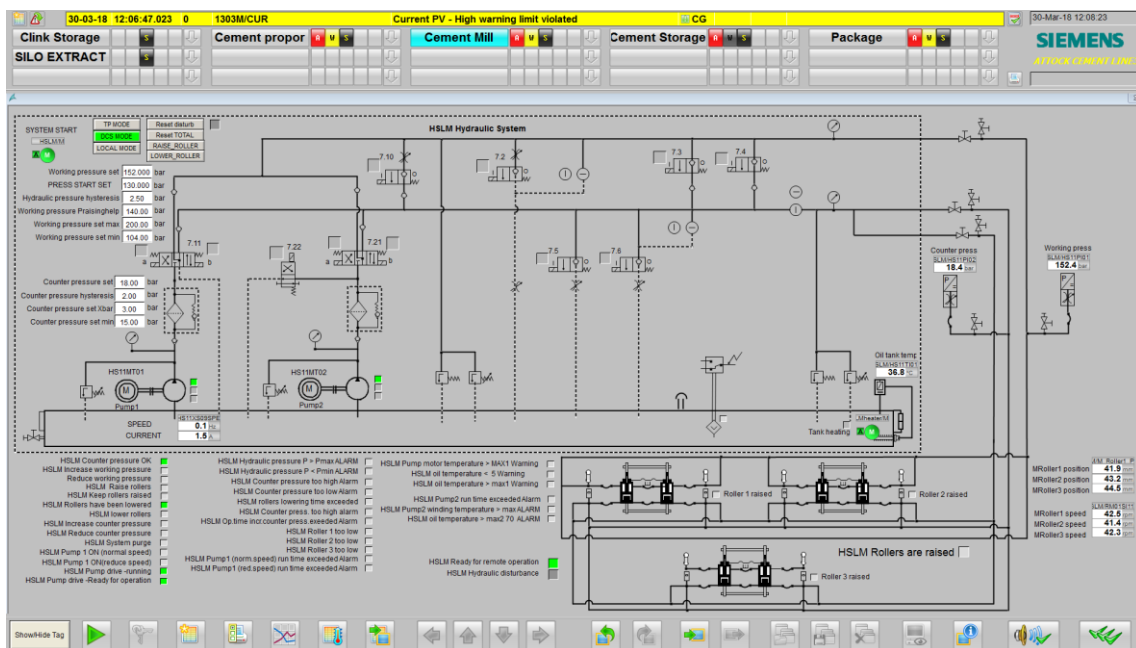


图 3 M 辊液压站（HSLM）控制界面

落辊条件满足后，M 辊液压站自动进行落辊操作，两个泄压电磁阀同时工作，反向压力迅速降低，当磨辊位置快降到位时，一个泄压阀关闭，泄压变慢，缓冲落辊速度。

同时液压泵开启，向工作压力加压，开启研磨模式。工作压力和反向压力可以随时通过输入框修改，另外可以设定偏差值，让系统可以在一定范围内自动调整压力。

磨内料层的厚度以及均匀情况可以通过三个 M 辊的位置反馈来观察，通常掌握在 45-55mm 之间最佳。如果料层表面不均匀，可以发出 S 辊落辊指令，S 辊有速度和位置两种方式进行控制。

如果需要手动控制，在 S 辊和 M 辊的子画面的抬辊、落辊按钮可以进行相应的手动操作。

此外，按莱歇工程师要求，还设置了故障排除确认键，在出现故障的情况下，必须确认问题排除后，点击按钮确认才能再次启动。

所有油站子画面的测点直接配合油站原理图显示，如工作压力、反向压力，关键部位油管温度和压力，油路流量值等，便于操作员理解和查找，并通过不同颜色的变化，提醒操作员。画面的相应的累积量统计可通过清零按钮置零。

2.3 其他小系统

磨内喷水系统：为了增加料层的稳定性，磨机落辊研磨的时候需要向磨内喷水，喷水时机的掌握很重要，如果落辊后喷水不到位，使得料层不均匀，很容易导致磨机振动。^[6]

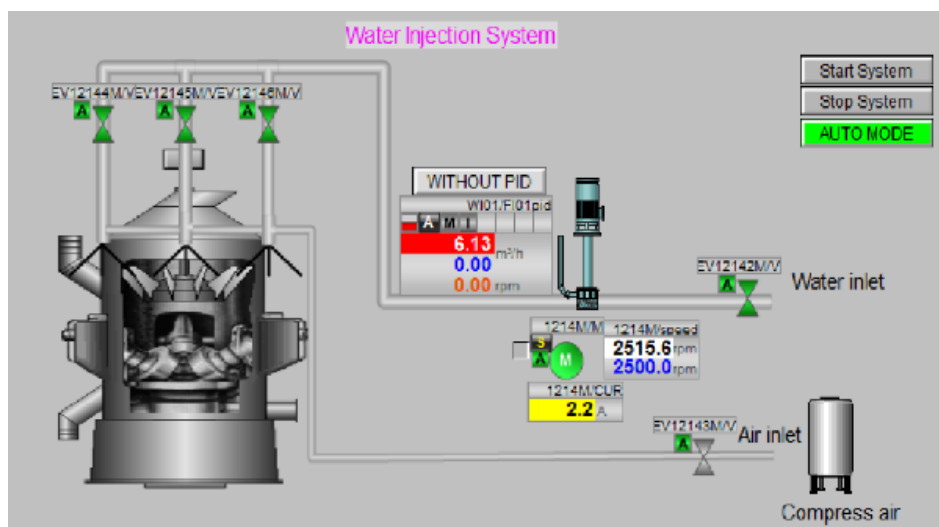


图 4 喷水系统

当系统确认喂料设备均已开启，并且喷水系统自动开关激活，喷水系统处于待启动状态。收到落辊指令后，进水阀、水泵、喷水阀依次开启，通过一个 PI 调节器控制变频器可以稳定流量。当收到抬辊信号时，进水阀和水泵关闭，气阀打开 10 秒钟，用压缩空气清除喷水管道内的水后关闭，之后喷水阀关闭。

助磨剂系统：当需要生产更高品质，更高细度的水泥产品时，需要在研磨时加入助磨剂，除了配有助磨剂罐，还配有一个水罐，可以进行适当稀释。该系统同样可以通过 PI 调节器控制变频水泵，锁定流量。

3 结束语

该系统不仅经过莱歇工程师、巴基斯坦工程师双重验收，在实际运行中也稳定可靠。但是仍存在一些问题，有待进一步完善，①专用柜与 FCS 柜通讯量庞大，各种变量 600 多个，系统编程在满足莱歇的逻辑表要求的同时，又要在上位机方便操作，一些逻辑只好在大系统和专用柜内重复编程，在以后的使用中可以对 FCS 柜和专用柜的控制范围进一步甄选、分配，从而达到最简最优的效果。②系统的企业管理级内容值得补充，如能源管理系统，质量管理体系和生产报表。

参考文献：

- [1] 容红. 莱歇辊式磨结构简介. [J] 当代水泥, 1992, (5): 7~9
- [2] 李海涛 主编. 郭献军, 吴武伟 副主编. 新型干法水泥生产技术与设备 北京: 化学工业出版社. 2005.
- [3] 张斌. 西门子全集成自动化解决方案[J]. 技术与应用, 2008(5):50-51
- [4] 孙旨义. 新一代过程控制系统 PCS7 及其应用[J]. 石油化工自动化, (4): 35-37.
- [5] 孙淮清, 王建中. 流量测量节流装置设计手册. 北京: 化学工业出版社, 2005 年: 2
- [6] 卫蕊艳. “LM56.2+2S”立磨矿渣粉磨系统及其操作控制. [J] 水泥工程, 2006, (1): 33-35

水泥粉磨状态监测与故障诊断方法探讨

宋传杰

(中建材(合肥)粉体科技装备有限公司, 安徽 合肥 230051)

1 引言

随着中国制造 2025 国家战略的推进, 加快建设制造强国, 加快发展先进制造业, 促进我国产业迈向全球价值链中高端成为时代旋律。目前水泥行业也不甘落后, 正朝着智能化、智慧化工厂方向推进。水泥行业产能的大型化、大量的大型化高转速设备被广泛应用。随着企业管理水平日益提高, 管理精度不断加深, 传统的事后维修、计划检修正在逐步向状态维修、预知维修迈进。设备状态监测及故障诊断技术作为预知检修的基础手段, 是推进设备管理的不断发展, 建立现代化智能工厂的重要和基础环节。

大型化的装备成本高昂, 维护不当出现故障时会给正常生产带来巨大损失。以粉磨系统的重要装备辊压机来说, 不管是在生料粉磨系统中, 还是水泥粉磨系统中, 一旦出现必须停机检修的故障则会导致系统停摆。辊压机的核心部件是一对相向旋转的转子。在生产中, 由于非磁性的金属件或异物的意外进机而造成的辊面破损、辊皮脱落, 如不能及时发现可造成严重的继发性损害——非磁性金属件或异物在闭路系统里不断循环, 使得辊面持续遭受冲击, 破损加剧, 辊皮脱落更多。另外转子的主轴承也是故障的一个重要方面, 在强烈冲击载荷的作用下, 主轴承的工况是相对恶劣的, 偶尔会出现未达额定寿命的断裂失效。

一般而言, 实施状态监测与故障诊断主要由于下图 1 所示的诉求: (1) 通过相关数据的采集, 能够实时监测设备运行状态。(2) 在运行中, 当故障出现时, 能够对故障进行实时警报。(3) 对于初期故障提前给予警示, 同时能预测其未来的发展趋势。(4) 通过对既往故障的分析总结反过来对产品设计给予指导, 对装

备在设计阶段进行优化。



图 1 状态监测与故障诊断的意义

对一些常见设备故障进行归纳总结，可以发现旋转机械的故障表现有着固有的规律。以粉磨系统装备辊压机为例，表 1 中罗列了辊压机在生产中常规故障的表现形式，并统计了相关可监测的变量。由表可知辊压机的故障大部分与振动相关，因此理论上来说，通过对振动、温度、电流等参数的实时监测，经由相关专家系统的分析判断，就能做到对一些故障的判定和预防。

表 1 辊压机的一些可能的故障表现

故障	可能的故障表现	可监测的变量
轴承异常	振动变大，有规则或不规则噪声，温度升高	振动，温度
辊面破损、辊皮脱落	辊子剧烈跳动	振动
大块金属等硬物进机	振动变大，电机电流变大	振动，电流
基座松动	整机振动变大	振动
共振	振动明显变大	振动
减速机异常	振动变大，电机电流增大	振动，电流
过载	电机电流变大，超阈值跳停	电流

2 实施方案探讨

2.1 系统架构

目前主流的状态监测与故障诊断物理架构如下图 2 所示。通过有线或无线传

传感器感知设备状态，将数据通过数据采集器采集处理并发送给就地工作站，就地工作站通过专有软件对数据进行收集、处理及分析，并进行实时的状态监测与故障警报。就地工作站与云平台互联并共享数据，同时可与企业运维及企业其他智能化系统相互整合及数据互通。

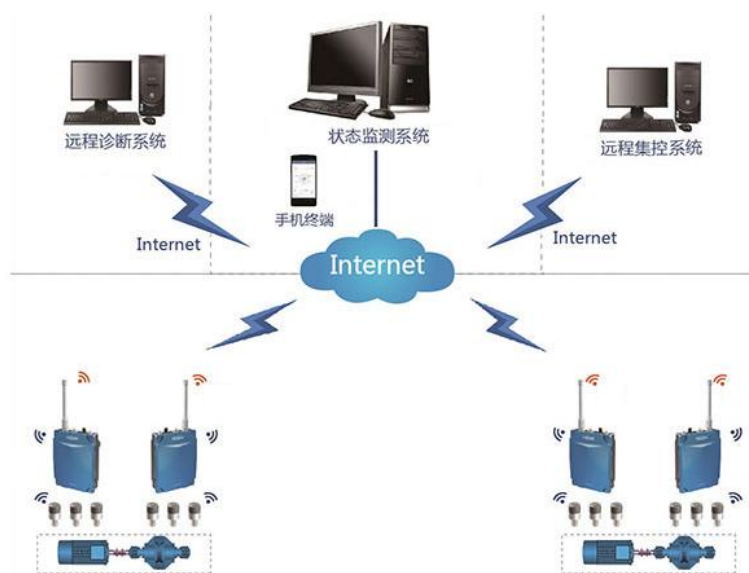


图 2 物理架构

逻辑上看，一套状态监测与故障诊断系统主要可分为：信号采集层，信号传输层，本地化处理及远程。信号采集层的核心为传感器和采集器，信号传输可采用有线或无线的方式。本地化处理的关键在于分析软件，而分析软件的核心是故障判断系统，同时故障的分析和判断系统也可远程放在云平台上。图 3 罗列了一种可供实施的系统架构。



图 3 系统架构框图

2.2 功能模块

上述状态监测与故障诊断系统如以功能来分，主要应包含以下功能模块：显示模块，故障警报功能块，连锁控制功能块，故障预警功能块，诊断报告及数据库等，详见图 4。

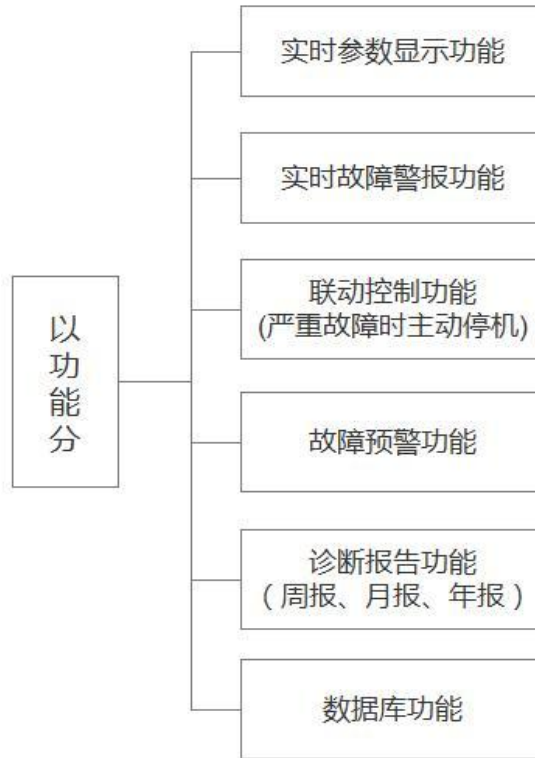


图 4 系统功能模块

2.3 路线图

一条细化的技术路线见下图 5，实施的细节主要建立在现有技术及成熟解决方案的基础上。比如振动测量传感器，市场上有很多功能完备的位移、速度和加速度传感器可供选择，我们只需要根据设备的工作频率及故障频率，来确定传感器的频率响应范围，并综合安装方式、工作方式及性价比等来确定选型。整个技术路线的重点在于数字信号分析和诊断模型的建立，这是整个诊断系统的大脑。

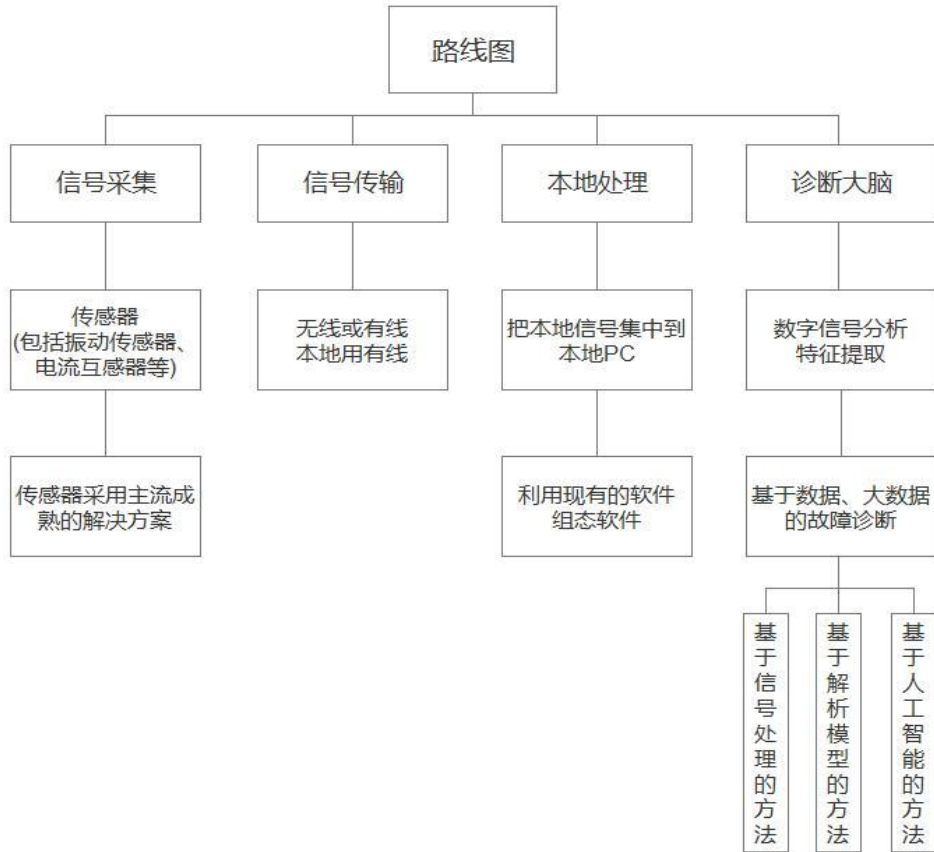


图 5 技术路线图

3 结语

目前对于轴承与齿轮的故障分析手段相对成熟，具有一套完整的理论与方法。而具体到相关的工艺设备时，其故障表现并非仅仅局限于轴承和齿轮箱，往往与工艺系统紧密相关。仍以辊压机为例，辊压机的非正常振动就可能与物料有关：物料颗粒过大表现出一种振动形式，而物料里细粉含量偏多又会造成另外一种振动形式，无论哪种情况引起的设备振动，无疑都是非常有害的，需要极力避免。怎样通过诊断大脑对不同的振动形式结合工艺参数及其他的状态监测变量，对系统工况进行推演和判断，是我们进行粉磨系统状态监测与故障诊断的一个重要方面，这方面无论是采用专家系统还是现代的一些人工智能方法，都需要大量数据的积累和持续的研究探索。



俄罗斯Slantsy 5000t/d熟料水泥生产线总承包工程