

# 工业煤粉锅炉中间仓落料冲击现象分析及解决方案

王实朴,李殿新,罗伟,裘星,于海鹏

(煤科院节能技术有限公司,北京 100013)

**摘要:**工业煤粉锅炉在煤粉储仓向中间仓卸料过程中,经常出现炉膛负压波动增大的现象,带来安全隐患;煤粉燃料供给不稳定是引起炉膛负压波动增大的原因之一。为解决此问题,结合工业煤粉锅炉系统中对送料稳定性与均匀性的要求,以能量守恒定律与动量定理进行分析;认为引起波动的主要因素为煤粉的自由落体运动对物料面产生不均匀冲击,并传导至中间仓底部,导致中间仓底部的煤粉堆密度不断变化,使得下游螺旋送料器的实际受料量随之改变,引起送料不稳定。以增加煤粉在中间仓的流动路程为设计原则,重新设计中间仓的内部结构,增加了伞帽的设计。经过实际测试,证明中间仓内部结构的改造有效,但实际应用中,伞帽的设计仍有改进空间。最后结合实际运行维护的便利性及可操作性,提出了在中间仓内部设计固定伞帽配合导流板方案,使中间仓的内部结构满足理论需要,具备可操作性,有效缓解了落料冲击的问题。

**关键词:**工业煤粉锅炉;落料冲击;螺旋输送机;炉膛负压波动;固定伞帽;旋转伞帽

中图分类号:TK229.6

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2018)03-0134-05

## Analysis and solution of the impact phenomenon in the middle bunker of industrial coal powder boiler

WANG Shipu, LI Dianxin, LUO Wei, QIU Xing, YU Haipeng

(China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China)

**Abstract:** When the industrial pulverized coal boiler pulverized coal bunker is discharged into the intermediate bin, the negative pressure fluctuation of the furnace often increases, which brings potential safety hazard. The instability of pulverized fuel supply is one of the reasons for the increase of negative pressure fluctuation in the furnace. In order to solve this problem and understand the working characteristics of the spiral conveyer feeder, the energy conservation law and the momentum theorem were analyzed in combination with the requirements of the stability and uniformity of the supply material in the industrial pulverized coal boiler system. It was considered that the main factor causing the fluctuation was the unequal impact of the free falling body movement of pulverized coal on the material surface and conduction to the bottom of the intermediate bin, which led to the constant change of the density of the pulverized coal pile at the bottom of the middle silo, and made the actual material amount of the downstream spiral feeder change. At last, it caused the unstable supply of the feed. In order to increase the flow distance of pulverized coal in the intermediate warehouse, the internal structure of the intermediate bin was redesigned and the design of the umbrella cap was added. The actual test proves that the transformation of the internal structure of the intermediate warehouse is effective, but in practical application, the design of the umbrella cap still has room for improvement. Finally, combined with the convenience and maneuverability of the actual operation and maintenance, a scheme was proposed to design a fixed umbrella cap and a diversion plate in the middle of the middle storehouse. It proves that internal structure of the intermediate storehouse meets the theoretical needs, and it is practical, and effectively alleviates the problem of the impact of the blanking.

**Key words:** industrial pulverized coal boiler; blanking impact; screw conveyer; negative pressure fluctuation of furnace; fixed an umbrella cap; rotating umbrella hat

收稿日期:2017-12-27;责任编辑:李柏熹 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2018.03.025

基金项目:煤粉工业锅炉浓相低脉动圆盘供料器研发项目(2017CX01)

作者简介:王实朴(1985—),男,河南平顶山人,助理研究员,从事煤粉锅炉系统设备的研发,E-mail:11141903@qq.com

引用格式:王实朴,李殿新,罗伟,等.工业煤粉锅炉中间仓落料冲击现象分析及解决方案[J].洁净煤技术,2018,24(3):134-138.

WANG Shipu, LI Dianxin, LUO Wei, et al. Analysis and solution of the impact phenomenon in the middle bunker of industrial coal powder boiler [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(3): 134-138.

## 0 引言

近年来国内市场对于高自动化、低燃料消耗、低排放的燃煤锅炉需求不断增长。工业煤粉锅炉系统具有启停速度快、燃料消耗低、污染物排放低、自动化程度高等特点,国内的煤粉工业锅炉系统经过十几年的发展与探索,技术趋于成熟<sup>[1]</sup>。

工业煤粉锅炉系统可分为11个子系统,其中煤粉燃料的供给单元(供料器)是煤粉储供子系统的核心设备之一,其燃料输送的稳定性、均匀性,都会对下游燃烧系统产生影响。螺旋输送机作为常用的粉料输送设备已广泛应用,而在工业煤粉锅炉系统中,螺旋输送机不仅可以当做系统尾部固体粉状废料的输送设备,并且通过精细化制造、局部改良后配合文丘里管,还可作为优秀的工业煤粉锅炉的燃料供给设备(螺旋供料器)<sup>[2]</sup>。中间仓是煤粉储供系统的一部分,用于将储仓排出的煤粉(进入供料器前)松散化、流态化,并通过称重实现锅炉运行时煤粉的实时计量功能,保证供料器稳定、均匀地接受煤粉,从而使供料器向下游输送煤粉时更加稳定均匀。

在工业煤粉锅炉的燃料储供系统中,螺旋供料器通常与中间仓(也叫缓冲仓)配合使用。实践发现,螺旋供料器上游的称重粉仓受料时,锅炉内煤粉燃烧波动增大,使锅炉运行稳定性变差<sup>[3-4]</sup>。本文通过分析螺旋输送机工作特征,以及物料在称重仓内的流动状态,以能量守恒定律与动量定理为理论基础,结合实践经验,寻求解决方案。

## 1 螺旋供料器的工作特征

在工业煤粉锅炉的燃料储供系统中,螺旋供料器采用螺旋杆拉(或推)送物料至一次风管,为保证燃烧稳定应使混有煤粉的一次风尽可能均匀,实现单位时间、单位体积一次风与煤粉燃料的比例相等或减少其误差为本文研究目的。影响风粉比的因素为风机供风量、螺旋下料量的稳定状况。

螺旋杆拉送(推送)物料方式为:物料填充于螺旋叶片间隙内,通过螺旋杆旋转使物料沿螺旋杆方向运动<sup>[5]</sup>,螺旋叶片间物料的填充率是影响螺旋杆运送物料的主要因素。影响填充率的主要因素有:物料粒径、螺旋杆转速对螺旋杆吃料量的影响、物料运输过程的实际堆密度。本文中,物料为平均粒径74 μm的煤粉,螺旋杆入料段淹没于煤粉中,故可认为其转速与吃料速度比恒定,落入中间仓之前的煤

粉堆密度取0.7 t/m<sup>3</sup>(介于堆积堆密度与松散态之间)。供料螺旋输送能力按照JB/T 7679—2008《螺旋输送机输送量计算方法》执行,且保证终端填充系数达1.05~1.15。输送量计算公式为

$$G = 60 \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} sn\varphi\rho C \quad (1)$$

其中, $G$ 为螺旋输送机的输送能力,t/h; $D$ 为螺旋叶片外径,m; $d$ 为螺旋叶片轴径,m; $S$ 为螺距,m,实体螺旋 $S = 0.8D$ ,带式螺旋 $S = D$ ;  $n$ 为螺旋转速,r/min; $\varphi$ 为煤粉填充系数,螺旋输送机入口处填充系数参考值为0.7; $\rho$ 为煤粉容积密度,t/m<sup>3</sup>,煤粉密度为0.7 t/m<sup>3</sup>;  $C$ 为螺旋输送机的倾斜度系数, $C = 0.9(5^\circ)$ 、 $0.8(10^\circ)$ 、 $0.7(15^\circ)$ 。填充系数应为计算所取螺旋叶片导程内的填充系数,螺旋中任意段导程的输送量理论上相等<sup>[6]</sup>。

由于细煤粉物料的物理特性,实际煤粉堆密度无法保持0.7 t/m<sup>3</sup>。煤粉流动过程中,气体流化、挤压、冲击、摩擦等都会对其堆密度产生影响。煤粉中间仓落料时,锅炉燃烧波动较大,供料器透气布袋振动明显;推测落料时,由星型卸料阀卸出煤粉在中间仓内做自由落体运动,对中间仓底部煤粉产生冲击,改变螺旋杆吃料堆密度,从而改变下游风管管道中的风粉比,本文将这种现象称为落料冲击。

## 2 落料冲击的模型及简单计算

中间仓通过星型卸料阀接受来自煤粉储仓的煤粉,并通过底部排出进入螺旋供料器,如图1所示。锅炉正常运转时,上位机实时对中间仓整体称重,设定仓内煤粉上、下限,中间仓内煤粉达到下限时开始由煤粉储仓供料,达到上限时停止供料,整个过程中间仓底部持续通过锅炉供料器排料<sup>[7-8]</sup>。

根据动量定理有

$$mv = Ft \quad (2)$$

$$v = (2gh)^{1/2} \quad (3)$$

式中, $m$ 为星型卸料阀每转卸煤粉的质量,kg; $v$ 为煤粉到达物料面的速度,m/s; $F$ 为煤粉对物料面的冲击力,N; $t$ 为煤粉与物料面接触时间,s; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>; $h$ 为下落距离,m;

根据式(2)、(3)可得

$$F = (2gh)^{1/2} m/t \quad (4)$$

在实际运行中,以DN350星型卸料阀为例,卸料阀转速为24 r/min,排料量为0.58 m<sup>3</sup>/min,每转卸料量0.024 m<sup>3</sup>,堆密度按0.7 t/m<sup>3</sup>计,每转卸煤

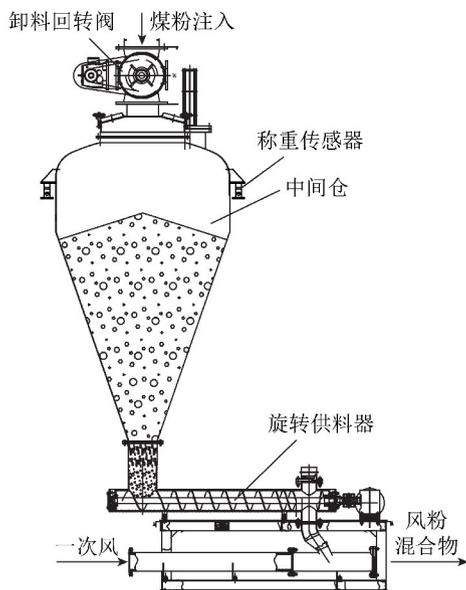


图1 中间仓-供料器设备

Fig. 1 Intermediate storehouse-feeder equipment

粉的质量  $m \approx 0.017 \text{ t} = 17 \text{ kg}$ 。中间仓上下限对应仓内料位距离受料口的距离  $h_1$ 、 $h_2$  为  $0.86 \sim 1.22 \text{ m}$  (仓内料位面为水平面), 星型卸料阀每转卸煤粉经自由落体运动后, 对物料面的冲击力  $F$  (假设星型卸料阀每格煤粉呈固态块状均匀下落, 与物料面接触时间  $t = 0.1 \text{ s}$ ) 为

受料开始时

$$F_1 = (2gh_1)^{1/2} m/t = 824 \text{ N} \quad (5)$$

受料结束时

$$F_2 = (2gh_2)^{1/2} m/t = 698 \text{ N} \quad (6)$$

中间仓开始受料时, 物料面冲击力为  $0 \sim 824 \text{ N}$ , 整个受料过程后减至  $698 \text{ N}$ , 此冲击力向下传导, 导致底部出料口煤粉堆密度不断变化<sup>[9]</sup>, 使供料误差增加, 不利于下游稳定燃烧。根据能量守恒定律, 星型卸料阀每格卸出煤粉的重力势能通过自由落体运动完全转化为煤粉到达底部时的动能, 所以要减少煤粉对仓内已有物料面的冲击力。由式(4)可知,  $F$  与  $h$ 、 $m$  正相关, 因此, 采用伞帽结构来改善。

### 3 缓冲方式

在中间仓内部沿煤粉下落路径设置伞帽(圆锥形壳体), 可使煤粉落在伞帽表面, 部分下落动能转化为摩擦势能消除, 相当于减小了  $h$ ; 煤粉下落至伞帽表面后向周围散开, 离开伞帽时分散下落, 减少了冲击物料面每转卸煤粉的质量。本文设计了固定伞帽和旋转伞帽。

#### 3.1 固定伞帽

固定伞帽结构如图2所示。在入料口正下方置一圆锥体, 综合考虑煤粉静态休止角及下落冲量, 圆锥表面角度设计为  $45^\circ$ , 目的是将星型卸料阀每格卸下的煤粉落至圆锥体表面打散, 然后沿圆锥下部散开落入中间料仓底部。打散后的煤粉沿圆周下落至料仓锥斗, 整个过程煤粉经过2次斜面(圆锥伞帽斜面和料仓锥斗内壁斜面), 均可将煤粉下落的部分动能转化为摩擦力做功, 减速煤粉<sup>[10-12]</sup>。通过2次斜面后, 减缓了煤粉对底部的冲击力。

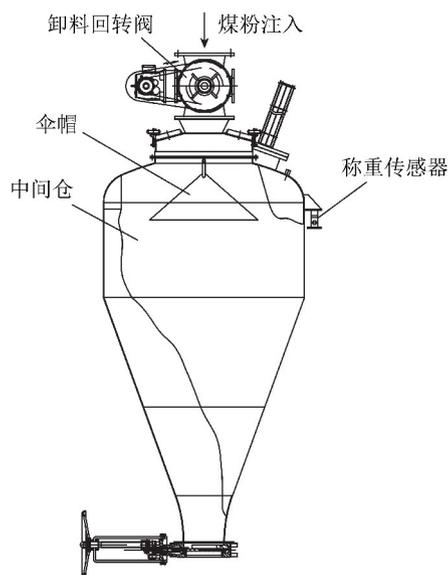


图2 固定伞帽结构

Fig. 2 Schematic of the fixed umbrella cap

#### 3.2 旋转伞帽

旋转伞帽结构如图3所示。旋转伞帽是在固定

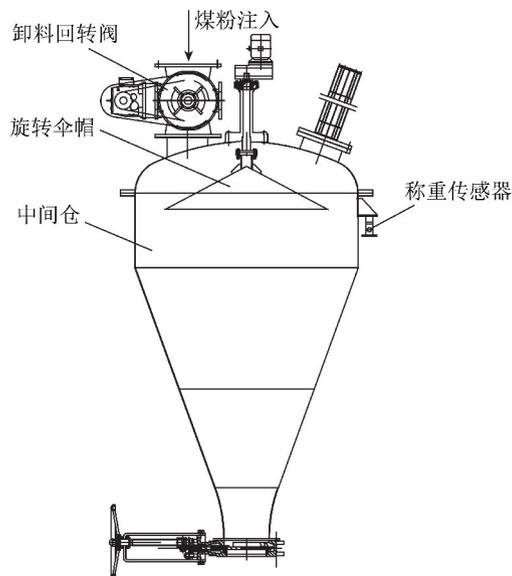


图3 旋转伞帽

Fig. 3 Schematic of a revolving umbrella cap

伞帽的基础上,采用电机带动伞帽旋转,利用伞帽斜面缓冲物料下落速度的同时,通过旋转将物料均匀散开,沿料仓内壁滑落至底部来减小冲击力。为了打散物料,伞帽圆锥表面不能是光滑的,要在圆锥表面做突起、凹槽或直接穿孔。

#### 4 旋转伞帽及固定伞帽的应用

山西保德选煤厂对煤粉储供系统中的1台中间

仓安装了固定伞帽与旋转伞帽。供料对于锅炉燃烧组织的稳定起着及其重要的作用,所以可通过系统正常运行时炉膛负压的波动范围来判断供料的稳定程度。锅炉运行煤粉基本指标见表1。

通过锅炉控制室上位机获得的炉膛负压波动实时监测曲线发现,中间仓未加装伞帽时,负压波动存在2种不稳定状态:①存在约2 min的长周期有规律波动;②在约30 s的短周期内,振幅波动范围

表1 锅炉运行煤粉基本指标

Table 1 Basic indexes of pulverized coal for boiler operation

指标	粒度	$M_t/\%$	$V_{daf}/\%$	$A_d/\%$	$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	$w(S_{t,d})/\%$	煤灰熔融性软化温度/ $^{\circ}C$
技术要求	0.074 mm 通过率98%	$\leq 5.0$	$\geq 30.00$	$\leq 15.00$	$\geq 23.00$	$\leq 0.6$	$\geq 1150$
试验方法	GB/T 189	GB/T 211	GB/T 212	GB/T 212	GB/T 213	GB/T 214	GB/T 219

12.5%~20.0%。中间仓加装固定伞帽后,炉膛负压短周期振幅波动没有明显改善;中间仓加装旋转伞帽后,炉膛负压的长周期和短周期振幅波动均有所改善。由实际运行时的炉膛负压曲线判断,中间仓加装伞帽后,供料稳定性确有改善,炉膛负压波动减弱,且长周期内波动范围更稳定,说明伞帽对供给锅炉煤粉堆密度的稳定起到了积极作用。

但是,伞帽也存在一些问题。由于煤粉的粉体特性,为了防止煤粉在伞帽与中间仓壁面架拱,固定伞帽在设计时其最大直径需小于中间仓内径600~700 mm。当煤粉堆积高度达到固定伞帽时,由于粉体不能像液体一样流动,物料无法进入圆锥伞帽内部而导致空间的浪费,在锅炉运行过程中由于中间仓容积的减小导致卸料频率增加,而伞帽无法完全消除落料冲击现象,所以在长周期范围内增加了供料波动的不稳定性。

煤粉在落到旋转伞帽圆锥面之后,在离心作用下被甩到仓壁,使得仓内空间被充分利用,相比固定伞帽对中间仓内容积的影响较小。但从加工和使用角度,电机带动伞帽旋转,涉及到传动体系的动平衡问题,伞帽圆锥体直径约800 mm,转动时锥体外沿速度(转速60 r/min)为2.5 m/s,如果传动不稳定,将会对传动轴、轴承、密封等部件产生过量磨损,使得传动系统不能长期稳定运行,增加维护成本。影响动平衡的因素有:①卷制伞帽钢板厚度的均匀性,卷制的圆锥圆度可控性,焊接质量;②若伞帽表面的突起、凹槽或开孔不均匀,转动时会产生偏心。实际加工过程中要做到均布公差精度要求比较困

难;增加传动机构同时也增加了维护检修的工作量,增加了隐含的故障点。

经过加装2种伞帽之后锅炉运行效果均有所改善,但减弱炉膛负压波动效果有限,同时旋转伞帽对加工精度、中间仓结构及后期维护要求较高。因此,既要减弱煤粉下落对物料面的冲击力,又不影响中间仓的容积,同时降低制造维护成本,避免使用动设备,提出第3种方案,即固定伞帽加导流板,如图4所示。

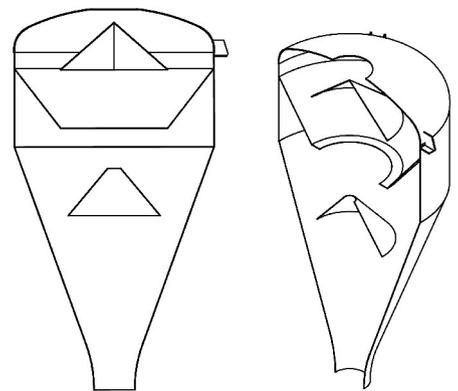


图4 固定伞帽加导流板结构

Fig. 4 Combination of fixed cap and guide plate

由图4可知,采用更小直径的固定伞帽,物料经伞帽打散下落过程中,在下部再设置一个导流板及顶部开口的小伞帽,目的是增加物料下落过程中的运动行程,导流板与伞帽斜面之间相对垂直;当物料由一斜面流经另一斜面后可充分减速。并且在物料经过不同的导流板时,利用物料自身对导流板的冲击使物料充分破散<sup>[13-15]</sup>。物料经小

伞帽流出后下落至粉仓圆锥内壁上,可继续沿斜面滑落。物料流经的导流板边缘可设置尖刺或其他方式的破拱机构防止在物料伞帽边缘架拱。而下方小伞帽顶部开口可有效防止伞帽内部没有物料填充,避免了空间的浪费。此方案成本增加少,不需要维护,且制作简单。

## 5 结 论

1) 根据动量定理,物料下落对仓底物料堆密度的影响主要是由物料下落的高差及单位物料的质量决定,高差越小、单位物料质量越小,物料下落对仓内物料面的冲击力越弱。在仓内增加伞帽以减少煤粉物料下落的高差,同时通过锥形面对煤粉的分散作用,减少了冲击物料面的单位煤粉质量,使仓内物料面受到的冲击力减弱,有利于仓底排料堆密度的稳定。

2) 实践证明,中间仓内增加伞帽对稳定供料有积极影响,但伞帽的形式需要综合考虑制造与使用成本。旋转伞帽虽然比固定伞帽的效果更佳,但综合考虑实际制造以及维护成本,其性价比不高。固定伞帽由于其固定的高度导致其减少高差的效果有限,并且由于粉体的流动特性,使得煤粉垂直下落后对仓内空间的利用率不高,且如果直径过大容易使煤粉在伞帽边缘与仓内壁之间形成架拱。所以在固定伞帽的设计基础上,以减少伞帽直径、增加流经斜面的数量、设置不同高度的斜面以最大程度适应不同高度的物料面为原则,提出固定伞帽加导流板的方案。

### 参考文献 (References) :

[1] 尚庆雨. 我国煤粉工业锅炉技术现状及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 201-206.  
SHANG Qingyu. Current status and development trend of pulverized coal industrial boilers in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 201-206.

[2] 全胜录. 组合式供料装置在工业煤粉锅炉中的设计与应用[J]. 神华科技, 2015, 13(6): 90-92.  
TONG Shenglu. The design and application of combined feeding device in industrial pulverized coal boiler[J]. Shenhua Science and Technology, 2015, 13(6): 90-92.

[3] 徐尧, 冯现河, 刘建航, 等. 一种组合式煤粉储供装置: CN102966967A[P]. 2013-03-13.

[4] 何海军, 冀飞, 周建明, 等. 一种组合式煤粉储供系统: CN 101575057 B[P]. 2011-10-05.

[5] 李振亮, 付长江, 李亚. 定量螺旋给料机的结构研究[J]. 盐业与化工, 2010, 39(1): 27-29.  
LI Zhenliang, FU Changjiang, LI Ya. Quantitative spiral feeder structural research[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2010, 39(1): 27-29.

[6] 王乾. 异形管壁粉末螺旋输送机的设计[J]. 煤矿机械, 2014, 35(8): 22-24.  
WANG Qian. Design on powder screw conveyor with abnormal shaped pipe wall[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(8): 22-24.

[7] 张乾熙, 贾明生, 侯冬尽. 组合式煤粉气力供料输送装置实验研究[J]. 冶金能源, 2017, 36(5): 20-23.  
ZHANG Qianxi, JIA Mingsheng, HOU Dongjin. Experimental studies on the combined feeder of pulverized coal[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2017, 36(5): 20-23.

[8] 姜思源. 煤粉工业锅炉对大同难燃煤适应性研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2014.

[9] 李志义, 王淑兰, 丁信伟. 粉体料仓的设计[J]. 能源化工, 1999(4): 11-15.  
LI Zhiyi, WANG Shulan, DING Xinwei. Design of silos[J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 1999(4): 11-15.

[10] 黄志远, 梁辉. 煤粉仓的设计与防爆[J]. 青海电力, 2003(S1): 59-62.  
HUANG Zhiyuan, LIANG Hui. Design and explosion prevention of the pulverized coal bin[J]. Qinghai Electric Power, 2003(S1): 59-62.

[11] 郭领军, 李贺军, 张秀莲. 模压压力对焦炭粉体堆积密度影响的试验研究[J]. 炭素技术, 2003(2): 1-4.  
GUO Lingjun, LI Hejun, ZHANG Xiulian. Effect of molding pressure on packing density of coke powder[J]. Carbon Techniques, 2003(2): 1-4.

[12] 郑利娇, 郭晓镭, 代正华, 等. 粉煤在流化料仓中的下料特性[J]. 化工学报, 2007, 58(9): 2375-2381.  
ZHENG Lijiao, GUO Xiaolei, DAI Zhenghua, et al. Flow characteristics of pulverized coal from aeration silo[J]. CIESC Journal, 2007, 58(9): 2375-2381.

[13] 姚力. 煤粉仓中煤粉流动特性的实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.

[14] 漆海峰, 郭晓镭, 陆海峰, 等. 煤粉的流动性测试及评价方法[J]. 化工学报, 2012, 63(2): 433-440.  
QI Haifeng, GUO Xiaolei, LU Haifeng, et al. Measurement of flowability of coal powders and research methods[J]. CIESC Journal, 2012, 63(2): 433-440.

[15] 张鹏. 卡尔指数法在评价煤粉粉体特性中的应用[J]. 中国粉体技术, 2000, 6(5): 33-36.  
ZHANG Peng. Application of carr index method in comprehensive evaluating properties of coal powder[J]. China Powder Science and Technology, 2000, 6(5): 33-36.