

三峰分形级配水煤浆提浓技术研究

段清兵,吕向阳,徐明磊,何国锋,张胜局,赵力明,刘烨伟,陈浩

(中煤科工清洁能源股份有限公司,北京 100013)

摘要:水煤浆气化采用传统单磨机工艺制浆时存在煤浆浓度低、流动性和雾化性较差等问题,基于粒度级配理论方法,在水煤浆中加入细浆和超细浆,实现水煤浆三峰分形级配,分析了三峰分形级配水煤浆提浓技术理论,论述了三峰分形级配煤浆提浓技术在山西阳煤丰喜聚源能源有限公司的工业应用情况。结果表明,采用三峰分形级配提浓技术后,水煤浆浓度由60.10%提高到64.19%,提高了4.09%;有效气含量由79.91%提高到82.12%,提高了2.21%;比氧耗降低了 $35\text{ m}^3/\text{km}^3$,比煤耗降低了 $20\text{ kg}/\text{km}^3$ 。吨合成氨耗煤量减小0.05 t,吨煤增合成氨量增加0.024 t。三峰分形级配提浓技术的成功研发使得水煤浆技术具有了制浆浓度高、煤种适应性宽、效率高、能耗更低的技术特点,将取代能耗高、效率低的常规棒磨机制浆工艺。

关键词:水煤浆;三峰分形级配;合成氨;煤浆提浓技术

中图分类号:TQ536

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2018)06-0037-06

Study of coal water slurry concentration technology based on three-peak fractal gradation

DUAN Qingbing, LYU Xiangyang, XU Minglei, HE Guofeng, ZHANG Shengju, ZHAO Liming, LIU Yewei, CHEN Hao

(China Coal Technology & Engineering Group Clean Energy Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Aiming at solving the problems of low concentration, poor fluidity and atomization of coal water slurry produced by single mill process, the theory and method of particle size gradation was systematically studied, and the three-peak fractal gradation of coal water slurry could be realized by adding fine slurry and ultra-fine slurry. Theory and industrial application of coal water slurry concentration technology based on three-peak fractal gradation in Shanxi Yangmei Fengxiquanzi Energy Co., Ltd. were analysed. Results show that coal slurry concentration increases from 60.10% to 64.19%, and the effective gas content increases from 79.91% to 82.12%. Specific oxygen consumption and specific coal consumption decrease by $35\text{ m}^3/\text{km}^3$ and $20\text{ kg}/\text{km}^3$, while ammonia consumption per ton of ammonia decreases by 0.05 t, and the amount of ammonia per ton of coal increases by 0.024 t. The three-peak fractal gradation concentration technology has advantage of high pulp concentration and efficiency, wide adaptability of coal types and lower energy consumption, which will instead of conventional bar mill pulping process.

Key words: coal water slurry; three-peak fractal gradation; synthetic ammonia; coal water slurry concentration technology

0 引言

我国“十三五”规划提出“大力开展工业节能,推广节能技术,运用节能设备,提高能源利用效率”。我国是世界上最大的煤化工生产国,产品多,

生产规模较大,当前正处于传统煤化工向现代煤化工转型的重要时期,现代煤化工要求加强科学规划,做好产业布局,提高质量效益,化解资源环境矛盾,实现煤炭清洁转化。水煤浆作为一种清洁的煤化工原料,对现代煤化工发展具有重要意义^[1]。

收稿日期:2018-06-28;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18062801

基金项目:中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2018QN040)

作者简介:段清兵(1979—),男,山东新泰人,硕士,从事水煤浆提浓技术研发与推广应用。E-mail:duanqingbing@cctgece.com。通讯作者:徐明磊。E-mail:xuminglei@cctgece.com

引用格式:段清兵,吕向阳,徐明磊,等.三峰分形级配水煤浆提浓技术研究[J].洁净煤技术,2018,24(6):37-42.

DUAN Qingbing, LYU Xiangyang, XU Minglei, et al. Study of coal water slurry concentration technology based on three-peak fractal gradation[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(6): 37-42.



移动阅读

水煤浆是由 65% ~ 70% 的煤、30% ~ 35% 的水和约 1% 的添加剂经过一定加工工艺制成一种新型煤基流体燃料和气化原料^[2]。水煤浆技术发展初期,制浆原料用煤均选用成浆性较好的煤种,随着成浆性较好的煤种储量减少,低阶煤成为主要制浆原料。因此,有必要提高成浆性差煤种的水煤浆浓度,扩大制浆原料范围。水煤浆浓度的影响因素主要有:煤质特性、粒度分布和添加剂。其中煤质特性是影响成浆性能的主要内因,在煤质特性和添加剂确定的情况下,粒度分布情况决定了水煤浆浓度的高低^[3]。不合理的水煤浆粒度分布情况,会造成水煤浆浓度偏低,稳定性和雾化性较差,制约了水煤浆气化效率^[4]。国内诸多研究机构开展了低阶煤水煤浆提浓技术研究,赵卫东^[5]采用水热处理法降低低阶煤的内水和含氧官能团,可显著提高低阶煤的成浆浓度。高志芳等^[6]研究了颗粒粒度分布和堆积效率对低阶煤成浆性的影响规律,以宝日希勒褐煤为原料在实验室配制出 60% 以上的水煤浆。中煤科工清洁能源股份有限公司开发的新一代水煤浆提浓技术通过分级研磨、粒径控制、三峰级配和添加剂

优化,可提高水煤浆浓度 4% ~ 6%,并大幅改善水煤浆流动性、稳定性和雾化性能。

山西阳煤丰喜泉稷能源有限公司(简称阳煤丰喜泉稷公司)设计年产 30 万 t 合成氨、52 万 t 尿素,项目采用水冷壁水煤浆加压气化技术,煤浆制备系统共由 2 台 $\phi 3.3 \text{ m} \times 5.8 \text{ m}$ 棒磨机生产线组成(2 台全开),单台棒磨机原煤处理量约 26 t/h。由于采用单磨机制浆工艺,水煤浆粒度级配不合理,水煤浆浓度偏低,仅为 60% 左右,且流动性、稳定性较差^[7]。为降本增效、扩大产能,决定采用中煤科工清洁能源股份有限公司开发的三峰分形级配水煤浆提浓技术对现有水煤浆制备系统进行改造,以提高水煤浆浓度,提高气化效率,达到节能增产的目的。

1 原煤及焦炉气分析

阳煤丰喜泉稷公司的原煤是典型低阶神府煤,可生产气化水煤浆,现为水煤浆提浓技术主要应用煤种,气化用煤煤质特性分析^[8]见表 1。工业生产合成气来源分为 2 部分,一部分为水煤浆气化,一部分为外购焦炉气。焦炉气成分组成及含量见表 2。

表 1 气化用煤煤质特性

Table 1 Coal quality characteristics of gasification coal

$M_t/\%$	$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$V_{ad}/\%$	$FC_{ad}/\%$	$w(S_{t,ad})/\%$	$Q_{net,ar}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
13.2	7.5	9.54	29.57	53.39	0.37	26.55

表 2 焦炉气成分及含量

Table 2 Composition and content of coke oven gas

成分	H_2	CO	CO_2	CH_4	N_2	O_2	H_2O	C_2H_6
体积分数/%	56.23	7.46	2.99	22.89	6.47	0.50	0.48	2.98

2 三峰分形级配水煤浆提浓技术理论分析

浓度高且流动性好的高浓度水煤浆要求水煤浆中的粒度分布合理,大小颗粒能够相互充填,减少空隙,空隙中的水被更多的排出来参与煤浆流动,从而使固体占有率即堆积效率提高。提高堆积效率的技术称为“级配”^[9]。掌握好水煤浆的粒度分布是制备高浓度水煤浆的关键技术之一^[10]。该理论在对国内外水煤浆粒度级配理论分析研究的基础上,结合低阶煤水煤浆粒度分布特点,探索粒度级配与水煤浆浓度、黏度之间的因变关系,并在“隔级堆积理论”基础上提出三峰级配理论,探索出具有较高堆

积效率的粒度级配模型,为制浆工艺的开发提供理论指导^[11]。

堆积效率 λ 与粒度分布的关系是水煤浆制备技术的基础理论之一,关于这方面研究成果较多,最简单的是单一粒径颗粒的堆积,其次是多种离散粒径颗粒的堆积,最复杂、最实用的是连续分布颗粒的堆积。

Scott 与 Ridgway 等研究表明,等径球体随机紧密堆积时的堆积效率为 0.64 ~ 0.56,平均 0.60,孔隙率 $\varepsilon = 0.4$,粒孔比 B 接近 4.45。实际颗粒为非球体,堆积效率低于球体。对于呈多角形的煤粒,Brown 与张荣曾研究表明,窄级别煤粒自然紧密堆

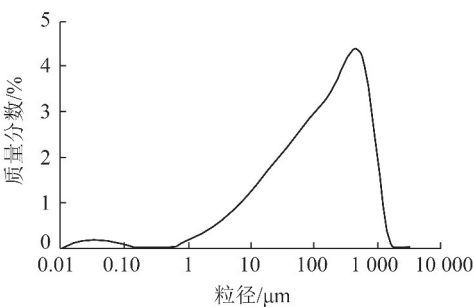
积时的堆积效率更接近等径球体呈正六面体紧密堆积时的堆积效率,为0.52,孔隙率 ε 为0.48,粒孔比 B 接近2.44。多种离散粒径颗粒混合堆积时,小颗粒有可能充填到大颗粒堆积形成的空隙中,有利于提高粒群的堆积效率。韩开锋等^[12]根据Hudson理论计算得出,要使小颗粒完全充填在大颗粒空隙中,所需粒孔比应至少达到5。

传统单磨机制浆工艺由于棒磨机棒与棒之间是线接触,在磨矿过程中仅对大颗粒进行有效研磨,致使煤浆中粒度比较均一,平均粒径100~150 μm 。新一代煤浆提浓工艺在大颗粒间填充了平均粒径30 μm 的细颗粒和5 μm 的超细颗粒,使大小颗粒能相互填充,减少颗粒间空隙,实现了煤浆颗粒的三峰级配,提高了煤浆堆积效率,进而提高水煤浆浓度4%~6%。不同制浆工艺下粒度分布如图1所示。

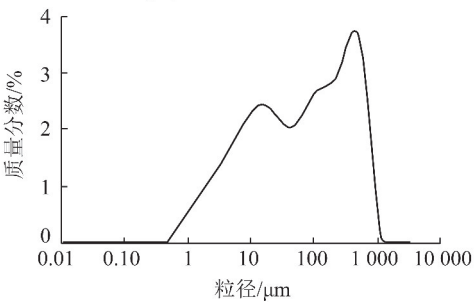
3 三峰分形级配水煤浆提浓技术的应用

3.1 工艺流程

三峰分形级配水煤浆提浓工艺流程为:棒磨机出料槽的气化水煤浆通过配浆泵计量后与界区外来的生产工艺水按照设定的目标稀释浓度一同进入粗浆槽混合,合格的粗浆通过粗浆泵计量后进入细磨机进行磨矿,细磨机磨机出料(平均粒径约为30 μm)自流至细浆槽,细浆槽内小部分水煤浆通过细浆泵输送至超细磨机进行超细研磨,细浆槽内大部分煤浆至一定液位时溢流至超细浆槽,超细研磨机研磨合格的超细浆(平均粒径约为5 μm)自流至超



(a) 传统单磨机制浆工艺



(b) 三峰分形级配水煤浆提浓工艺

图1 不同制浆工艺的粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of different pulping processes

细浆槽与溢流的细浆进行混合,混合后的细浆和超细浆通过超细泵输送至棒磨机中,最终形成水煤浆的三峰粒度级配,使成品气化煤浆的粒度级配更加合理,从而提高水煤浆浓度,同时还能改善煤浆的流动性、稳定性及雾化性能^[13]。

阳煤丰喜泉稷公司所用三峰分形级配水煤浆提浓装置含1台CEXM型细磨机和1台CECXM型超细磨机及其附属罐、泵等,其工艺流程如图2所示。

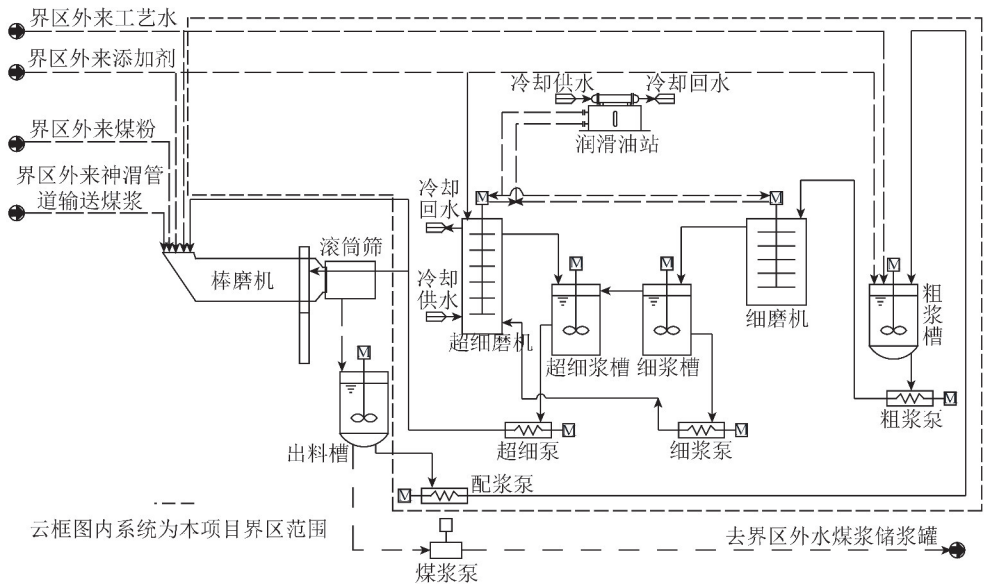


图2 三峰分形级配提浓工艺流程

Fig. 2 Three-peak fractal gradation concentration process

3.2 运行效果

3.2.1 提浓前后水煤浆质量变化

阳煤丰喜泉稷公司煤浆提浓装置于2018年3月10日单体试车完成,3月14日正式投料运行,调试阶段细浆量逐步提高至目标值,进料口降低生产水量,提高水煤浆的出料浓度。在添加剂用量不变的情况下,整个水煤浆提浓装置设备运行稳定,各项工艺参数均达到设计要求。阳煤丰喜泉稷公司于2018-03-21T 24:00—03-24T 24:00对煤浆提浓项目进行72 h考核,提浓前后水煤浆指标结果对比见表3。由表3可知,阳煤丰喜泉稷公司采用三峰分形级配水煤浆提浓工艺后,水煤浆流态不变,水煤浆黏度符合气化水煤浆标准,水煤浆浓度提高了4.09%。

表3 提浓前后水煤浆指标对比

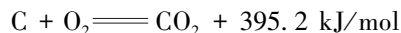
Table 3 Comparison of coal water slurry indexes before and after concentration

项目	水煤浆浓度/%	黏度/(mPa·s)	流态
提浓前	59.95	574	B-
	60.13	628	B-
	60.22	655	B-
提浓前均值	60.10	619	B-
提浓后	64.18	914	B-
	64.23	923	B-
	64.15	918	B-
提浓后均值	64.19	918	B-
提浓前后差值	4.09	299	—

3.2.2 提浓后气化指标变化

水煤浆浓度的提高会使得气化有效气量增加,

氧气消耗量减小,其理论依据为:将水煤浆中50℃水加热气化至1 250℃所需热量主要由以下2个反应提供,即



1 mol C生成CO₂放出热量395.2 kJ,而生成CO放出热量仅为110.5 kJ,少放出热量284.7 kJ。生成CO₂或CO的总气体体积相同,仅是消耗的O₂和放出的热量不同。因此,在固定进气化炉干煤量条件下,煤浆浓度提高后,将减少进气化炉水分,从而节约部分热量,若把水煤浆气化炉看成一个热量平衡炉,此部分节约的热量可由生成CO₂向CO转变,进而增加CO总量,降低O₂消耗。

气化炉内水分为2部分,一部分是水煤浆中水,这部分水是完全参与气化反应的;另一部分是激冷水,在无催化剂条件下,这部分水不参与气化反应。在固定进气化炉投煤量条件下,通过计算得出1 t/h水由50℃气化至1 250℃所需热量为9 872 028 kJ。因此,每减少1 t水节约的热量可将CO₂转换成CO的体积和O₂减少分别为776.7和388.4 Nm³/h。为进一步了解水煤浆浓度的提高对气化效果的影响,对水煤浆提浓前后气化数据进行了对比,由于阳煤丰喜泉稷公司的合成气来源分为2部分,一部分为水煤浆气化产生的合成气,另一部分为外购的焦炉煤气。因此,仅针对气化比煤耗(标准状态下)、比氧耗(标准状态下)、吨合成氨耗煤量、吨煤增合成氨量进行统计对比。为保证气化指标数据能真实反映水煤浆浓度提高导致的指标变化,提浓前总煤耗与焦炉气量与提浓后基本一致,结果见表4。

表4 提浓前后气化指标对比

Table 4 Comparison of gasification indexes before and after concentration

项目	有效气含量/%	比氧耗/(m ³ ·km ⁻³)	比煤耗/(kg·km ⁻³)	吨合成氨耗煤量/t	吨煤增合成氨量/t
提浓前	79.91	420	614	1.44	0.695
提浓后	82.12	385	594	1.39	0.719
差值	2.21	-35	-20	-0.05	0.024

由表3、4可知,阳煤丰喜泉稷公司使用三峰分形级配水煤浆提浓技术对现有制浆系统进行改造后,在保持添加剂用量不变的前提下,水煤浆质量和气化效果都有了明显改善。水煤浆浓度由提浓前的60.1%提高到64.19%,提高了4.09%;有效气含量由提浓前的79.91%提高到82.12%,提高了

2.21%;比氧耗降低了35 Nm³/kNm³,比煤耗降低了20 kg/kNm³。吨合成氨耗煤量减小了0.05 t,吨煤增合成氨量增加了0.024 t。

3.2.3 提浓后经济效益分析

在固定合成氨产量的前提下,可以通过吨合成氨耗煤量减小计算出节煤的经济效益,在固定煤量

的前提下,可通过吨煤增合成氨量,计算出合成氨产量增加的经济效益^[14]。为了更准确反映水煤浆浓

度提高带来的经济效益,对比了提浓前后合成氨平均完全成本(固定生产量约1 050 t/d),具体见表5。

表5 提浓前后合成氨平均完全成本对比

Table 5 Comparison of ammonia synthesis average cost before and after concentration

项目	材料成本/元	职工薪酬/元	电费/元	制造费用/元	管理费用/元	财务费用/元	合计完全成本/元
提浓前	1 173.67	38.79	151.55	221.67	23.93	109.16	1 718.77
提浓后	1 108.21	45.04	168.36	237.20	24.46	110.05	1 693.32
差值	-65.46	6.25	16.81	15.53	0.53	0.89	-25.45

由表5可知,提浓前吨煤增合成氨量为0.695 t,提浓后为0.719 t,提浓后合成氨的年增量约为0.921 6万t。阳煤丰喜泉稷公司生产规模为年产30万t合成氨,可根据提浓后合成氨的年增量、吨合成氨的价格以及吨合成氨的生产成本,计算出经济效益(吨合成氨价格按照当前合成氨价格2 950元/t,税率1.16);提浓后合成氨利润为26 330万元,提浓前合成氨利润为24 730万元。

根据提浓前后的合成氨利润差值,可推算出水煤浆浓度提高后,阳煤丰喜泉稷公司的年经济效益可增加1 600万元。

4 结 论

1)三峰分形级配提浓技术及配套设备在阳煤丰喜泉稷公司成功投用,水煤浆浓度由60.1%提高到64.19%,提高了4.09%;有效气含量从79.91%提高到82.12%,提高了2.21%;比氧耗降低了35 Nm³/kNm³,比煤耗降低了20 kg/kNm³。吨合成氨耗煤量减小0.05 t,吨煤增合成氨量增加0.024 t,预期可为企业带来1 600万元的年经济效益。

2)开发新工艺、新装备和适配性好的高效添加剂是解决我国水煤浆技术发展的关键^[15]。制浆工艺和装备是水煤浆制备技术的核心,完善的制浆工艺和装备对于提高水煤浆质量和降低制浆成本起着至关重要的作用^[16]。三峰分形级配提浓技术的成功研发使得水煤浆技术具有了制浆浓度高、煤种适应性宽、效率高、能耗更低的技术特点,未来势必取代能耗高、效率低的常规棒磨机制浆工艺。

参考文献(References):

[1] 周大地. 我国“十三五”能源发展战略问题思考[J]. 石油科技论坛,2016,35(5):1-8,19.
ZHOU Dadi. Opinions on energy development strategy of China's 13th Five-Year Plan [J]. Oil Forum,2016,35(5):1-8,19.

[2] 何国锋,詹隆,王燕芳. 水煤浆技术发展与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2013.
[3] 段清兵. 中国水煤浆技术应用现状与发展前景[C]//第三届煤炭科技创新高峰论坛——煤炭绿色开发与清洁利用技术与装备论文集[C]. 北京:[s. n.],2016.
[4] 段清兵,何国锋,陈浩,等. 神府煤水煤浆动态稳定性试验研究[J]. 煤质技术,2015(1):53-57,72.
DUAN Qingbing, HE Guofeng, CHEN Hao, et al. Dynamic stability experimental research of coal water mixture of Shenfu coal [J]. Coal Quality Technology,2015(1):53-57,72.
[5] 赵卫东. 低阶煤水热改性制浆的微观机理及燃烧特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.
[6] 高志芳,朱书全,黄波,等. 粒度分布对提质褐煤水煤浆性能影响的研究[J]. 选煤技术,2009(1):1-5.
[7] 汪家铭. 山西阳煤丰喜泉稷能源公司“3052”项目投产[J]. 四川化工,2016,19(2):35.
[8] 刘尚利,孙海勇,段清兵,等. 分级研磨级配制浆技术的研究及应用[J]. 化学工程,2015,43(1):61-64,78.
LIU Shangli, SUN Haiyong, DUAN Qingbing, et al. Study and industrial application of coal water mixture by grade grinding technology [J]. Chemical Engineering,2015,43(1):61-64,78.
[9] 周永涛. 三峰分形级配水煤浆提浓技术研究[J]. 洁净煤技术,2018,24(1):63-68,73.
ZHOU Yongtao. Three peak fractal grading coal water slurry concentration technology [J]. Clean Coal Technology,2018,24(1):63-68,73.
[10] 段清兵. 分级研磨低阶煤高浓度水煤浆制备技术与应用[J]. 煤炭科学技术,2012,40(10):113-115,103.
DUAN Qingbing. Application of high concentration coal water slurry preparation technology with graded grinding low rank coal [J]. Coal Science and Technology,2012,40(10):113-115,103.
[11] 段清兵,张胜局,段静. 水煤浆制备与应用技术及发展展望[J]. 煤炭科学技术,2017,45(1):205-213.
DUAN Qingbing, ZHANG Shengju, DUAN Jing. Development outlook and preparation and application technology of coal water mixture [J]. Coal Science and Technology,2017,45(1):205-213.
[12] 韩开锋,曾新吾. Hudson理论中裂隙参数的适用性研究[J]. 石油物探,2006(5):435-440,15.
[13] 张杰. 水煤浆提浓技术的应用及对气化炉运行效率的影响

- [D]. 北京:北京化工大学,2016.
- [14] 张胜局. 煤浆浓度提高后经济效益评价方式的探讨[J]. 煤炭工程,2015,47(8):126-128.
- ZHANG Shengju. Discussion on evaluation method of economic benefit of coal slurry concentration [J]. Coal Engineering,2015,47(8):126-128.
- [15] 柳金秋,段清兵. 不同分散剂及添加量对神木煤成浆性能的影响[J]. 煤炭科学技术,2018,46(5):224-228.
- LIU Jinqiu,DUAN Qingbing. Effects of different dispersants and additives on the properties of Shenmu coal slurry [J]. Coal Science and Technology,2018,46(5):224-228.
- [16] 王锴,李哲,闫思勤,等. 低阶煤浮选降灰及提高水煤浆浓度技术研究[J]. 煤炭工程,2018,50(1):124-127.
- WANG Kai,LI Zhe,YAN Siqin,et al. Research on low rank coal flotation and coal water slurry concentration improvement [J]. Coal Engineering,2018,50(1):124-127.