

燃煤电厂飞灰脱碳技术研究进展

邓庆德,姬海宏,胡鑫,柏杨
(华电电力科学研究院有限公司,杭州 310030)

摘 要:为了有针对性地选择燃煤电厂粉煤灰中未燃碳的脱除工艺,分别介绍了粉煤灰浮选法(湿法)脱碳,流态化法、燃烧法和电选法(干法)脱碳技术,综述了国内外关于浮选法脱碳工艺和药剂制度研究发展现状,以及摩擦电选法脱碳装置、电选法工艺的研究成果,指出了浮选法脱碳和电选法脱碳存在的问题及各自的适用性。

关键词:粉煤灰;脱碳;浮选法;流态化法;燃烧法;电选法

中图分类号:X 705 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2018)10-0056-03

0 引言

粉煤灰为燃煤发电企业固体废弃物。2015 年我国年产粉煤灰约 5.7 亿 t^[1],粉煤灰已成为我国最大的工业固体废弃物。目前,粉煤灰的利用价值主要在建筑材料领域,但高烧失量粉煤灰在该领域,特别是传统水泥行业的应用很少。制约此类粉煤灰在该领域应用的一个重要原因为粉煤灰含碳量高:我国约 30% 的燃煤发电企业粉煤灰含碳量超过 12%;40% 的燃煤发电企业粉煤灰含碳量超过 8%;以无烟煤为燃料的 W 火焰炉机组产生的粉煤灰含碳量可接近 20%^[2];循环流化床粉煤灰含碳量影响因素多,含碳量高且变化幅度大。高含碳量从外观上影响粉煤灰灰度^[3],也不满足 GB/T 1596—2005《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》的要求。因此,研究粉煤灰脱碳技术,降低粉煤灰烧失量,是改善高含碳量粉煤灰在水泥和混凝土中利用率的重要途径。

粉煤灰脱碳工艺分湿法和干法。湿法脱碳通过加入捕收剂和起泡剂,利用浮选机分离碳粒与灰粒。干法脱碳有流态化法、电选法、燃烧法等。

1 湿法脱碳

学者对湿法脱碳工艺的研究主要为浮选法脱碳工艺。浮选法脱碳原理基于粉煤灰和未燃碳润湿性差异。粉煤灰颗粒接触角一般为 10°左右,灰中碳粒接触角为 60°~70°^[4],两者接触角差异性使得粉煤灰和灰中未燃碳润湿性不同,因此可用浮选法分离。

粉煤灰浮选脱碳工艺来源于煤炭一段浮选工艺,而粉煤灰中未燃碳在高温下形成,其疏水性与煤炭存在差异。由于一段浮选工艺受入料因素的干扰,故将未经改进的煤炭一段浮选工艺用于脱除粉

煤灰中未燃碳存在脱碳效率低、脱碳分离指标不理想等缺点^[5]。

针对传统一段浮选工艺缺点,王立刚等^[6]进行了二段开路浮选新工艺试验研究,新工艺以充气速率、浮选药剂、浓度等工艺条件和工艺流程为研究对象,以性能成本比优化为目标,在一段浮选工艺基础上增加了扫选开路流程。实验原料采用神华大堡热电厂高碳粉煤灰,浮选药剂为柴油和仲辛醇,采用二段开路浮选流程。试验结果发现此新工艺更适用于高含碳量粉煤灰脱碳。为推广浮选脱碳工艺的工业示范应用,湖南某粉煤灰厂建设了 1 条 5×10^5 t/a 的粉煤灰浮选脱碳生产线^[7],该粉煤灰生产线采用粗浮选、精浮选两道工序,浮选柱加药装置采用全自动加药装置,成功浮选出符合用户需求的粉煤灰和精碳。

粉煤灰中未燃碳与煤炭性质不同,故煤炭浮选工艺中常用的药剂制度不完全适用于粉煤灰浮选脱碳。李国胜等^[8]采用 X 射线衍射、X 射线荧光分析等现代分析手段,从粉煤灰、未燃碳表面性质角度探讨了未燃碳可浮性差的原因,采用旋流-静态微泡浮选柱,研究了黏性起泡剂 KD 对浮选体系泡沫稳定性的影响,试验获得的粉煤灰碳脱除率为 91.88%,烧失量为 3.15%。边炳鑫等^[9]采用正交试验方法,以鸡西发电厂堆场粉煤灰为试验原料,在 XFD-115 型单槽浮选机上进行了常温浮选试验。试验考虑了粉煤灰入料浓度、药剂比、捕收剂用量、起泡剂用量对浮选效果影响,该浮选试验分选效率仅为 56.02%,精煤产率为 7.34%。

粉煤灰浮选脱碳技术研究及工程实践均以煤炭浮选工艺为基础。由于粉煤灰中未燃碳浮选活性低于煤炭,导致浮选效率低,回收未燃碳较为困难,研究者必须根据所浮选粉煤灰及其未燃碳物理化学性质,选择合适的浮选药剂,改进浮选工艺,方能获得

预期浮选效果^[10]。

2 干法脱碳

2.1 流态化法脱碳

流态化法脱碳技术是基于气力的分选工艺。粉煤灰中未燃碳颗粒与其他颗粒密度存在较大的差异,在气流作用下,密度较小的未燃碳颗粒向床层区域的上部漂浮,密度较大的粉煤灰颗粒向床层区域底部沉积,经过筛分、分级后,得到的粉煤灰约 80% 能满足用户需求^[11]。黎强,杨玉芬等^[12-13]采用流态化分选法对粉煤灰脱碳进行了实验研究。结果发现,流态化法脱碳能降低灰中未燃碳含量,但未燃碳含量降低效果受粉煤灰粒径影响大,故仍需进一步研究,改进工艺,提高脱碳率。

2.2 燃烧法脱碳

燃烧法脱碳指燃煤企业将产生的高碳粉煤灰再次进入锅炉内燃烧,从而降低粉煤灰中含碳量。燃烧法脱碳技术一般在流化床锅炉中应用。美国的 Progress Materials NC(进步材料有限公司)在佛罗里达州坦帕(Tampa)市采用特制的流化床,成功完成了小规模燃烧法脱碳实验。我国福建漳平发电有限公司也在原有循环流化床锅炉基础上,通过工艺改进,以飞灰回燃脱碳的方式降低粉煤灰中含碳量,并降低了发电煤耗。针对飞灰回燃法脱碳效率较低的问题,梅琳等^[14]设计了纯燃飞灰热态试验台,在试验台上开展了流化床粉煤灰燃烧脱碳试验研究,飞灰的碳脱除率可达到 75%。

2.3 电选法脱碳

电选法脱碳的关键在于颗粒充分带电和带电颗粒在电场中高效分离。颗粒带电主要有,电晕带电、摩擦带电和感应带电 3 种方式。粉煤灰与未燃碳性质不同,经过摩擦带电装置后分别带有异种电荷,能在高压电场下实现颗粒分离。国内外关于电选法脱碳研究主要集中在摩擦电选法。

国外摩擦电选研究起源于 19 世纪 60 年代意大利卡利亚里大学。学者^[15-18]开展了煤、磷酸盐等物质摩擦电选半工业性试验研究,结果认为影响摩擦电选效果的关键因素为物料性质、摩擦面特性、试验条件。典型摩擦电选装置有带内挡板的流化床摩擦带电系统(FTB 摩擦电选系统)、美国 STI 公司摩擦电选机、Thomas A. L. 摩擦电选装置等^[19]。其他电选装置基本上由这 3 种典型装置衍变而来。FTB 摩擦电选系统构成包括旋风给料系统、流化床摩擦充电器、高压直流电源、分离室、集料槽、氮气筒、静电计等。该系统工作时,氮气使待分离物料流态化,颗粒进入分离室带异种电荷,在旋风给料系统负压作

用下进入高压直流电源两极板之间,在电场作用下分别向正、负极板聚集,最后在集料槽中进行收集,实现了粉煤灰与未燃碳的分离^[20-22]。采用 FTB 摩擦电选系统的流化床,目前仅在实验室应用,尚未进行商业推广应用。STI 摩擦电选机主要由给料系统、接料槽等组成。工作时,待分离物料由两平行极板间缝隙进入,在皮带输送过程中,颗粒之间、颗粒与极板材料间通过摩擦带异种电荷,在电场作用下,带异种电荷颗粒分别向极板两端聚集,从而实现分离^[23]。STI 摩擦电选机处理量大、物料粒度适应性好、分离效率高、可靠性好,已经实现商业应用,缺点在于皮带损耗大,且脱碳过程中无法对粉煤灰有效分级。Thomas A. L. 摩擦电选装置主要由文氏给料系统、摩擦带电装置、高压分选室、分离板及旋风回收器等组成。该装置工作时,由文氏给料器控制进入摩擦带电装置的入料量,氮气使待分离颗粒流态化。流态化的颗粒通过碰撞带异种电荷并进入高压分选室,带有异种电荷的颗粒在高压电场下运行轨迹不同,被旋风分离器分离、脱碳^[24-26]。此装置中,电场结构显著影响粉煤灰和未燃碳分离效果。在电选法脱碳工艺改进研究方面,SOONG Y.^[27]采用超声筛和摩擦电选联合脱碳分选工艺,对取自海湾电力公司、肖维尔电厂、葛伦林电厂的 3 种高烧失量粉煤灰进行了分选试验,发现先对粉煤灰进行筛分再进行摩擦电选,灰中未燃碳脱除效果较好。

国内学者在电选法脱碳理论、脱碳设备和工艺方面开展了研究工作。以曹志群等^[28-29]为代表的学者对粉煤灰带电、分选机理进行了研究,探讨了影响粉煤灰电选脱碳产品质量的工艺条件。经研究,获得了台湾某电厂高碳粉煤灰最优操作条件。典型的电选设备有 XDF 型电选机、YNDF-I 型粉煤灰静电脱炭装置以及带式摩擦电选装置。其中,XDF 型电选机主要采用电晕带电方式使待选颗粒带电;其余两种均采用摩擦带电方式使待分离物料带异种电荷,在电场作用下实现分离。带式摩擦电选装置已实现工业应用。电选法脱碳法目前开发了 3 种典型工艺流程:以生产粉煤灰或碳粉为目标的单一电选脱碳工艺;以生产各级别粉煤灰为目标的电选—分级工艺;电选—分级—粉磨工艺。除煤粉炉粉煤灰外,清华大学王启民等^[30-31]还研究了循环流化床的粉煤灰高压电选脱碳。研究结果表明,电选脱碳对循环流化床粉煤灰脱碳效果较好,具有潜在推广价值。

3 粉煤灰碳脱除工艺的对比分析

通过本文叙述,粉煤灰碳脱除工艺具有以下特点。

(1)湿排法产生的粉煤灰,建议采用浮选法脱碳;干排法产生的粉煤灰,建议采用电选法、燃烧法等干法脱碳方式脱碳。

(2)与湿法脱碳相比,干法脱碳优点在于能节约药剂、能耗成本,且不会导致分选后粉煤灰活性降低;缺点在于脱碳效率低于湿法。

(3)电选法脱碳技术可在干燥和高温状态下在电厂就地处理粉煤灰,是一种很有推广价值的技术。今后需进一步推进电选法脱碳工艺的研发,以实现大规模工业应用。

参考文献:

- [1]宿宇,方华峰.我国粉煤灰相关政策研究[J].洁净煤技术,2016,22(4):52-55.
- [2]刘亮,吕鑫磊,安小强,等.粉煤灰脱碳的浮选试验研究[J].选煤技术,2009(1):10-13.
- [3]王亮,何长征,盛昌栋,等.大型电站粉煤灰灰度影响因素分析[J].热力发电,2016,45(2):116-121.
- [4]薛芳斌,纪莹璐,宋慧平,等.粉煤灰浮选脱碳试验研究[J].粉煤灰综合利用,2013(4):14-20.
- [5]贾凯,曹亦俊,李国胜,等.电厂粉煤灰浮选脱碳试验研究[J].矿山机械,2012,40(3):88-91.
- [6]王立刚,彭苏萍,罗立平.粉煤灰浮选除炭技术优化[J].煤炭科学技术,2001,29(8):21-23.
- [7]梁吉军,王壮壮,郭立朋,等.粉煤灰浮选脱碳工艺系统设计及优化[J].粉煤灰,2010(6):44-45.
- [8]李国胜,刘炯天,曹亦俊,等.粉煤灰中难浮未燃炭的柱式浮选脱除试验研究[J].煤炭学报,2013,38(2):308-312.
- [9]边炳鑫,吕一波,李哲.粉煤灰中未燃炭的分选试验研究[J].煤炭学报,2000,25(6):660-663.
- [10]何新露,常治铁,张丛香.粉煤灰选炭的试验研究[J].粉煤灰,1999,11(3):6-9.
- [11]徐晶晶.粉煤灰电选脱碳技术的开发——粉煤灰带电特征的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2007.
- [12]黎强,陈昌和,杨玉芬,等.粉煤灰脱碳的流态化实验研究[J].煤炭转化,2005,25(4):70-73.
- [13]杨玉芬,陈清如,骆振福.流态化技术干法脱炭的理论分析与试验研究[J].中国矿业大学学报,2003,32(6):632-635.
- [14]梅琳,卢啸风,王泉海,等.飞灰流化床燃烧脱碳的试验研究[J].中国电机工程学报,2014,34(26):4454-4459.
- [15]LUGA A, SAMUILA A, R Morar, et al. Tribocharging techniques for the electrostatic separation of granular plastics from waste electric and electronic equipment[J]. Particulate Science and Technology, 2016, 34(1): 45-54.
- [16]S K Mohanta, B Rout, R K Dwari, et al. Tribo-electrostatic separation of high ash coking coal washery rejects: Effect of moisture on separation efficiency[J]. Powder Technology, 2016, 294: 292-300.
- [17]CHEN Y, YOUNG PM, FLETCHER D F, et al. The effect of actuator nozzle designs on the electrostatic charge generated in pressurised metered dose inhaler aerosols[J]. Pharmaceutical Research, 2015, 32(4): 1237-1248.
- [18]SOONG Y, IRDI G A, MCLENDON T R, et al. Tribo electrostatic separation of fly ash with different charging materials[J]. Chemical Engineering and Technology, 2007, 30(2): 214-219.
- [19]张杰.粉煤灰旋摩擦电选脱碳的试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [20]DWARI R K, RAO K H. Non-coking Coal preparation by novel tribo-electrostatic method[J]. Fuel, 2008, 87(17): 3562-3571.
- [21]DWARI R K, RAO K H. Fine Coal preparation using novel tribo-electrostatic separator [J]. Minerals Engineering, 2009, 22(2): 119-127.
- [22]TAO D, FAN M, JIANG X. Dry coal fly ash cleaning using rotary tribo-electrostatic separator[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(5): 642-647.
- [23]TAO Y, DING Q, DENG M, et al. Electrical properties of fly ash and its decarburization by electrostatic separation [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 25(4): 629-633.
- [24]SOONG Y, SCHOFFSTALL M R, LINK T A. Tribo-electrostatic beneficiation of fly ash[J]. Fuel, 2001, 80(6): 879-884.
- [25]GRAY M L, CHAMPAGNE K J, SOONG Y, et al. Physical cleaning of high carbon fly ash[J]. Fuel Processing Technology, 2002, 76(1): 11-21.
- [26]J D Bittner, F J Hrach, S A Gasiorowski, et al. Triboelectric belt separator for beneficiation of fine minerals[J]. Procedia Engineering, 2014, 83: 122-129.
- [27]SOONG Y, SCHOFFSTALL M R, GRAY M L. Dry beneficiation of high loss-on-ignition fly ash[J]. Separation and Purification Technology, 2002, 26(2): 177-184.
- [28]曹志群,张胜广,龚文勇,等.台湾某电厂粉煤灰电选脱碳试验研究[J].矿冶工程,2004,24(6):37-41.
- [29]曹志群.粉煤灰物性与电选机理研究[D].长沙:冶金部长沙矿冶研究院,1999.
- [30]王启民,王玉召,吕俊复,等.烧失量法测量循环流化床锅炉飞灰炭的系统误差[J].热能动力工程,2006,21(6):585-589.
- [31]LU Junfu, WANG Qiming, LI Yong, et al. Unburned carbon loss in fly ash of CFBB boilers burning hard coal[J]. Tsinghua Science and Technology, 2003, 8(6): 687-691.

(本文责编:陆华)

作者简介:

邓庆德(1981—),男,江西吉安人,高级工程师,硕士,从事燃煤发电企业固体废弃物资源化利用研究工作(E-mail:dengqd@126.com)。