

660 MW 超超临界 CFB 锅炉冷渣器选型技术经济性研究

邬万竹

(神华集团循环流化床技术研发中心,陕西 西安 710065)

摘要:为比较不同型式的冷渣器对 660 MW 超超临界 CFB 锅炉机组能耗的影响,通过分析使用风水联合冷渣器及滚筒冷渣器时锅炉效率、厂用电率的变化,计算超超临界 CFB 机组使用不同冷渣器时供电煤耗的大小。提出冷渣器选型方案,对不同方案进行经济性比较。研究表明,底渣量和标煤单价对冷渣器选型有重要影响,标煤单价高、底渣量大的项目,宜选用风水联合冷渣器,技术经济性好。为了兼顾冷渣器的技术经济性和运行可靠性,可采用风水冷渣器与滚筒冷渣器搭配使用的方案。研究内容可为燃用低热值煤的 CFB 锅炉冷渣器选型提供参考。

关键词:超超临界;CFB 锅炉;冷渣器选型;风水联合冷渣器

中图分类号:TK229.6

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2017)02-0103-05

Technical economic study on type selection of slag cooler for a 660 MW ultra-supercritical CFB boiler

Wu Wanzhu

(Shenhua Group CFB Technology R&D Center, Xi'an 710065, China)

Abstract: To compare the effects of different types of slag cooler on energy consumption of 660 MW ultra-supercritical CFB boiler, the variation of the efficiency and the power consumption of the plant using air-water combined slag cooler and the roller slag cooler were analyzed, then the amount of coal consumption of the unit with different slag coolers was calculated. A selection scheme of the slag cooler was proposed. Different schemes were compared. The results indicates that the slag quantity and standard coal price of the unit have an important effect on the selection of slag cooler. With standard coal price and slag quantity increases, the economy of the unit with air-water combined slag cooler is better than that with rolling ash cooler. Considering technical economy and reliability of the slag cooler, the scheme of mix-using air-water combined slag cooler and the rousing ash cooler is recommended. The research provides reference for the type selection of slag cooler in a CFB boiler burning low calorific value coal.

Key words: ultra-supercritical; CFB boiler; type selection of slag cooler; air-water combined slag cooler

0 引 言

循环流化床(CFB)燃烧技术是大规模清洁利用矽石、中煤、煤泥等低热值燃料的最佳选择^[1]。随着煤质下降,尤其是燃用煤矽石时,底渣量较大,若能将底渣热量回收进燃烧系统,锅炉效率可提高 1% 以上,节能降耗意义重大^[2]。大型 CFB 锅炉通常采用滚筒冷渣器或风水联合冷渣器。早期的 CFB 锅炉使用风水联合冷渣器时,由于煤粒度控制不好

和风水冷渣机结构设计等原因,在使用过程中普遍出现了进渣量波动、内部结焦、排渣不畅等问题,无法发挥风水冷渣器优势^[3-5]。现有 CFB 锅炉普遍使用滚筒冷渣器^[6-7]。滚筒冷渣器虽然运行稳定性更高,但其有效回收利用底渣热量的能力较低。现有滚筒冷渣器冷却水一般使用凝结水,这会导致凝结水主路水量减少,进入对应低压加热器的冷却水也相应减少,汽轮机末级抽气量减少,导致热排挤,使汽轮机的冷源损失增大,冷渣器回收的热量并未全

收稿日期:2016-09-20;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.02.020

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600200)

作者简介:邬万竹(1988—),男,四川泸州人,工程师,主要从事循环流化床燃烧技术的研究。E-mail:wuwanzhu@126.com

引用格式:邬万竹.660 MW 超超临界 CFB 锅炉冷渣器选型技术经济性研究[J].洁净煤技术,2017,23(2):103-107.

Wu Wanzhu. Technical economic study on type selection of slag cooler in a 660 MW ultra-supercritical CFB boiler[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(2): 103-107.

部有效利用,降低了汽轮机的效率^[8-10]。

国内多家电厂风水联合冷渣器运行情况表明,只要燃煤粒度得到有效地控制,风水联合冷渣器运行的稳定性可以保证^[11-14]。随着大型 CFB 技术的不断成熟和机组运行水平提高,各电厂对入炉煤粒度控制要求日益严格。燃煤粒度控制水平已经得到明显改善。因此,风水联合冷渣器已经基本具备了在电厂推广应用的条件。在 350、600 MW 超临界 CFB 锅炉成功运行的经验基础上,为进一步加强低热值煤综合利用力度、提高机组运行效率。按照国家“十三五”电力研发计划有关要求,660 MW 超超临界 CFB 机组有望在“十三五”期间建成投运。在充分考虑使用滚筒冷渣器和风水联合冷渣器时各项因素对锅炉效率、厂用电率及供电标煤耗的影响基础上,从技术经济性角度对 660 MW 超超临界 CFB 机组冷渣器选型进行分析。

1 计算方法

1.1 底渣量及热损失计算

$$G_{\text{ash}} = BA_{\text{ar}} + 3.12BRw(S_{\text{ar}})$$

式中, G_{ash} 为锅炉灰渣量,t/h; B 为锅炉总煤量,t/h; R 为锅炉炉内脱硫钙硫比 Ca/S,项目设计炉内 Ca/S 为 2 左右; A_{ar} 和 $w(S_{\text{ar}})$ 分别为 35.4% 和 0.99%。

拟建 660 MW 超超临界 CFB 项目设计煤量为 380.4 t/h,经计算得出锅炉灰渣量 139.6 t/h。底渣占总灰渣量比例 λ_{ash} 根据锅炉厂提供的相关数据按 40% 取值。则锅炉底渣量 B_{ash} 为 55.86 t/h。

底渣热损失为 η_{ash} 计算方法为

$$\eta_{\text{ash}} = \frac{B_{\text{ash}}(h_1 - h_2)}{BQ_{\text{net,ar}}} \quad (1)$$

式中, h_1 和 h_2 分别为热渣焓和冷渣焓,热渣温度取 890 °C,冷渣温度按 150 °C 计算。

1.2 锅炉效率与供电煤耗计算

使用风水联合冷渣器回收底渣热量后,冷渣器流化风吸收热量送回到炉内,减少了锅炉底渣热损失,锅炉效率随之发生变化。

风水联合冷渣器中流化风吸收热量对锅炉效率的影响值 η_{bi} 为

$$\eta_{\text{bi}} = \lambda B_{\text{ash}}(h_1 - h_2)/BQ_{\text{net,ar}} \quad (2)$$

其中, λ 为冷渣器中风冷比例系数。水冷部分作如下考虑,使用风水联合冷渣器后,其使用的凝结水水冷管排吸热,排挤低加抽汽使汽轮机汽耗减少。为便于统一计算,将此部分汽耗减少量通过折算,计算出其等效锅炉效率提高值 η_{b2} 。使用风水联合冷渣器后飞灰底渣含碳量变化对锅炉效率影响为 η_{b3} 。考虑各种因素后的锅炉效率修正值 η_{b} 为

$$\eta_{\text{b}} = \eta_{\text{b0}} + \sum \eta_{\text{bi}} \quad (3)$$

其中, η_{b0} 为锅炉厂提供基准锅炉效率设计值,为 92.5%。

全厂供电标准煤耗率 b_s 是凝汽式发电厂的通用热经济性指标^[15],计算公式为

$$b_s = \frac{3600Q_b}{P_e(1 - \eta_e)\eta_b q_L} \quad (4)$$

式中, Q_b 为锅炉热负荷,MW,由锅炉设计资料可得; P_e 为机组发电功率,为 660 MW; q_L 为标煤发热量 29 307 kJ/kg; η_e 为机组厂用电率,此项基于 660 MW 超超临界项目厂用电设计值 5.12%,以其为基准,考虑使用不同型式的冷渣器对厂用电率的影响后再代入计算。

2 结果与分析

拟建 660 MW 超超临界 CFB 机组采用的工程煤种工业分析和元素分析见表 1。

表 1 煤质特性
Table 1 Coal properties

煤样	工业分析/%					元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/$ (MJ · kg ⁻¹)
	M_t	M_{ad}	A_{ar}	V_{daf}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	$S_{\text{t,ar}}$	
设计煤种	24.48	2.49	31.03	36.86	28.54	38.67	2.14	0.58	2.18	0.91	14.35
校核煤种	23.36	2.25	35.43	39.95	25.60	35.17	1.98	0.61	2.45	0.99	12.99

2.1 底渣热损失计算结果

按该项目设计煤种来计算,其底渣显热可回收量为 40 992.35 MJ/h,则使用风水冷渣器时提高锅

炉效率理论值 η 为 0.751%。但在实际使用风水冷渣器时会有其他一些因素影响热量回收效果,如使用风冷渣器后回风穿透力弱导致飞灰含碳上涨、风

冷比例受总风量限制等。

2.2 不同型式冷渣器对锅炉效率的影响

综合考虑各因素,对风水冷比为 2 : 1 的风水冷渣器^[16]和滚筒冷渣器进行测算。计算不同型式的冷渣器对锅炉效率的影响,即量化使用滚筒冷渣器和风水联合冷渣器时对锅炉底渣显热的转化率。

使用风水联合冷渣器各因素对锅炉效率影响计算如下:

1) 风水联合冷渣器流化风回收热量对锅炉效率的提高。忽略冷渣器散热,考虑流化床冷渣器与锅炉一体化设计与制造,则冷却风回收底渣热量的比例为 66.6%。

2) 风水联合冷渣器冷却水回收热量对锅炉效率提高的折算值。冷渣器的冷却水采用凝结水,水冷部分的热量不能直接提高锅炉效率,只能减少汽轮机的热耗。由于水冷部分回收的热量对汽轮机抽汽的排挤,造成汽轮机冷源损失增大。600 MW 超临界 CFB 锅炉实际运行参数表明,汽轮机汽耗减少量仅占水冷部分回收热量的 6.5% 左右。为了便于比较,将水冷部分回收的热量减少汽轮机热耗折算为锅炉效率。有效回收热量向锅炉效率折算时,汽轮机及附属系统效率取 47%。

3) 不完全燃烧损失的影响。使用风水联合冷渣器后,由于冷渣器流化风作为二次风回到炉膛,对炉内原有的燃烧组织有一定的影响,飞灰含碳量约上涨 0.2%。但由于燃烧停留时间增加,底渣底灰含碳量有所下降。综合二者影响,不完全燃烧损失变化通过设计燃烧优化后可为 0。

各影响因子对锅炉效率的影响见表 2。

表 2 使用风水联合冷渣器各因素对锅炉效率的影响
Table 2 Influence of various factors on boiler efficiency by using air-water combined slag-cooler

影响因子	因素	影响	计算	增益/%	
η_{b1}	风冷部分	风冷比例	66.6%	0.666η	0.500
η_{b2}	水冷部分	水冷比例	$(\eta \times 0.334 \times 33.4\%)$	$(\eta \times 0.334 \times 0.065)/0.47$	0.035
η_{b3}	不完全燃烧损失	飞灰含碳上涨,底灰含碳下降	对 q_4 (不完全燃烧损失) 影响为 0		0

考虑各种因素后,使用风水联合冷渣器锅炉效率修正值 η_b 为 93.035%。

使用滚筒冷渣器时,采用凝结水纯水冷,汽轮机汽耗减少量占总回收热量的 6.5%,其对锅炉效率

影响增益为: $\eta_{bc1} = 0.065\eta/0.47 = 0.104\%$,则使用滚筒冷渣器锅炉效率修正值 η_{bc} 为 92.604%。

在使用风水冷渣器时,其水冷部分热量并未回收进入锅炉,但采用 ASME 标准测算锅炉效率时,水冷吸热收益也计入热力系统。则使用 ASME 标准测算锅炉效率时,锅炉效率可提高,理论值达到 0.751%。

2.3 使用风水冷渣器对用电率的影响

为保证机组的运行稳定性与排渣均匀性,机组拟选用 6 台冷渣器,每台冷渣器设计出力为 25 t/h。每台冷渣器流化风量按 26.2 km³ 计算。风水联合冷渣器使用一次风作为流化风,相比滚筒冷渣器,一次风量多需要 157.2 km³,二次风量相应减少。参考已投运的超临界 CFB 机组,则一次风机电流增加 80.1 A,二次风机电流降低 41.7 A,每台滚筒冷渣器功率为 25 kW。使用风水联合冷渣器时机组厂用电功率增加 208.7 kW,使用风水冷渣器相比滚筒冷渣器厂用电率增加 0.032%。

2.4 不同型式冷渣器对供电标煤耗的影响

使用不同型式冷渣器对机组供电标煤耗的影响见表 3。其中基准数据为初步设计值。

表 3 使用各种冷渣器型式供电标煤耗计算结果
Table 3 Calculation results of standard coal consumption rate of power supply using various types of slag-cooler

冷却方式	锅炉效率/%	厂用电率/%	供电标煤耗/(g·kWh ⁻¹)	煤耗降低/(g·kWh ⁻¹)
基准	92.500	5.120	292.050	0
滚筒冷渣器	92.604	5.120	291.724	0.326
风水冷渣器	93.035	5.152	290.477	1.573
风冷理论值	93.251	5.152	289.807	2.243

综上所述,本项目使用风水冷渣器时,在考虑风冷渣器带来的厂用电增加等不利因素后,最终的供电煤耗相比基准值降低 1.573 g/kWh。

使用滚筒冷渣器时,不能直接提高锅炉效率。其回收的热量进入汽机后也有大部分被冷源损失带走。经计算,使用滚筒冷渣器可降低供电标煤耗 0.326 g/kWh。

2.5 不同底渣比例对机组经济性的影响

为全面比较不同底渣比例 λ_{ash} 对锅炉效率及供电标煤耗的影响。底渣比例按 25%、30%、35%、40%、45% 分别进行了计算,基准锅炉效率仍按

92.5%取值,计算结果如图1所示。

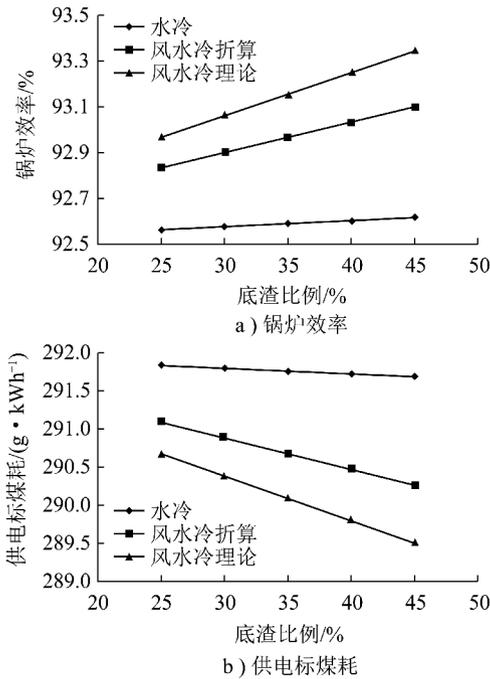


图1 锅炉效率、供电标煤耗与底渣比例关系

Fig. 1 Relationship between of slag rate, boiler efficiency and standard coal consumption

由图1可知,底渣比例越大,使用风水联合冷渣

器对锅炉效率提高效果越明显,同时对供电煤耗的降低值贡献越大。因此在底渣占比较大的项目中,使用风水联合冷渣器的热经济性更佳。

2.6 不同冷渣器选型方案技术经济性比较

对660 MW超超临界CFB机组冷渣器选型的3种备选方案,以采用6台滚筒冷渣器为基准方案,计算方案2(6台风水冷渣器)与方案3(4台风水冷渣器+2台滚筒冷渣器)在标煤价格198元/t、底渣比例为40%时技术经济性。使用费用现值法来计算各方案的20a收益时,贷款利率年利率按4.9%取值。计算结果见表4。

由计算结果可知,采用4台风水联合冷渣器+2台滚筒冷渣器的方案3,20a收益后总费用现值差比全采用滚筒冷渣器的方案1低105.79万元。采用方案3技术经济性更优。

通过计算可得出,随着标煤价格的上涨、底渣比例的增大,方案2与方案3的总费用现值差与基准方案相比均有所降低,即标煤单价越高、底渣比例越大,选用风水联合冷渣器的经济性越好。

在现有风水联合冷渣器技术上研发,采用滚筒冷渣器与风水联合冷渣器相结合,优势互补,运行效果更佳。

表4 不同冷渣器选型方案技术经济性比较

Table 4 Technical economy comparison of different type of slag-cooler

项目	方案1	方案2	方案3	
主要参数	冷渣器数量/台	6	4+2	
	冷渣器型式	滚筒冷渣器	风水冷渣器	风水/滚筒冷渣器
	单台冷渣器出力/(t·h ⁻¹)	25	25	25
投资费用	冷渣器单价/万元	90	210	210/90
	冷渣器总价/万元	540	1 260	1 020
	一次风机总价/万元	基准	60	60
	二次风机总价/万元	基准	-40	-40
	初投资差/万元	基准	740	500
运行维护费用	设备维护费用/(万元·a ⁻¹)	基准	18.00	12.00
	节约标煤费用	基准	-50.82	-60.20
	运行收益差/(万元·a ⁻¹)	基准	-32.82	-48.20
	费用现值法折算20a收益/万元	基准	-412.51	-605.79
费用现值差	投资费用与运维费用现值20a收益之和/万元	基准	327.49	-105.79

3 结论

1) 燃用设计煤种时,其底渣比例相对较小,一定程度上影响了风水联合冷渣器对锅炉效率的提高。底渣比例为40%时,采用风水联合冷渣器锅炉

效率提升理论值为0.751%。充分考虑风冷渣器带来的厂用电增加等不利因素后,锅炉效率升高0.535%,供电标煤耗可降低1.573 g/kWh。

2) 使用滚筒冷渣器时,不能直接提高锅炉效率。其回收的热量进入汽机侧后也有大部分被冷源

损失带走。使用滚筒冷渣器时供电标煤耗可降低 0.326 g/kWh。

3) 提出了 660 MW 超超临界 CFB 机组冷渣器选型的 3 种可行方案。以采用 6 台滚筒冷渣器为基准方案,方案 2(6 台风水冷渣器)与方案 3(4 台风水冷渣器+2 台滚筒冷渣器)在标煤价格 198 元/t、底渣比例为 40% 时,方案 3 的经济性更佳。随着标煤价格的上涨、底渣比例的增大,方案 2 与方案 3 的总费用现值差与基准方案相比均有所降低,即标煤单价越高、底渣比例越大,选用风水联合冷渣器的经济性越好。综合考虑各方案的经济性与运行稳定性,660 MW 超超临界 CFB 机组冷渣器选型可选用 4 台风水冷渣器+2 台滚筒冷渣器组合型式。

参考文献 (References) :

[1] 岳光溪,吕俊复,徐鹏,等. 循环流化床燃烧发展现状 & 前景分析[J]. 中国电力,2016,49(1):1-13.
Yue Guangxi, Lyu Junfu, Xu Peng, et al. The up-to-date development and future of circulating fluidized bed combustion technology [J]. Electric Power, 2016, 49(1):1-13.

[2] 肖平,郭涛,徐正泉,等. 大容量流化床式冷渣器的开发与运行性能研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(S1):113-117.
Xiao Ping, Guo Tao, Xu Zhengquan, et al. Large capacity fluidized bottom ash cooler and its operation performance [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2009, 29(S1):113-117.

[3] 舒茂龙,陈继辉,卢啸风,等. 大型 CFB 锅炉流化床冷渣器技术探讨[J]. 电站系统工程,2007,23(2):29-33.
Shu Maolong, Chen Jihui, Lu Xiaofeng, et al. Investigation on fluidized bed bottom ash coolers in large-scale CFB boilers [J]. Power System Engineering, 2007, 23(2):29-33.

[4] 蔡新春,高清萍,董晓华,等. 410 t/h CFB 锅炉风水联合冷渣器的改进[J]. 锅炉技术,2007,38(5):59-62.
Cai Xinchun, Gao Qingping, Dong Xiaohua, et al. Improvement of air-water combined type solids cooler for 410 t/h CFB boiler [J]. Boiler Technology, 2007, 38(5):59-62.

[5] 王欣,张政. 循环流化床锅炉风水联合冷渣器存在问题及其处理措施[J]. 热力发电,2008,37(4):40-42.
Wang Xin, Zhang Zheng. Problems existing in air-water combined slag cooler for CFB boilers and handling measures thereof [J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(4):40-42.

[6] 王颖聪,关心,江来. 大型循环流化床锅炉特性试验研究与优化运行[J]. 电站系统工程,2015,31(5):43-45.
Wang Yingcong, Guan Xin, Jiang Lai. Experimental and optimized operation of characteristic parameter of CFB boiler [J]. Power System Engineering, 2015, 31(5):43-45.

[7] 卫荣章,白涛. CFB 锅炉输渣系统选型研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(5):103-106.

Wei Rongzhang, Bai Tao. Selection of slag conveying system of CFB boiler [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(5):103-106.

[8] 姜孝国,张缙,杜守国. CFB 锅炉冷渣器及渣的热量回收[J]. 锅炉制造,2002(4):20-22.
Jiang Xiaoguo, Zhang Man, Du Shouguo. Ash cooler of CFB boiler and heat recover of slag [J]. Boiler Manufacturing, 2002(4):20-22.

[9] 白玉明,刘柏谦,白玉莹,等. 滚筒冷渣器内颗粒床运动状态的离散单元法模拟[J]. 热力发电,2016,45(2):75-80.
Bai Jueming, Liu Baiqian, Bai Jueying, et al. DEM simulations of solid motion in rotary drum ash cooler [J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2):75-80.

[10] 侯致福,杨玉环,高建强. 300 MW CFB 空冷机组冷渣器余热利用系统经济性分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2015, 42(3):85-89.
Hou Zhifu, Yang Yuhuan, Gao Jianqiang. Economic analysis on waste heat utilization system of slag cooler of 300 MW CFB air-cooling units [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2015, 42(3):85-89.

[11] 钱志永,朱云鹏,熊体华. 大型 CFB 锅炉风水联合冷渣器运行问题分析及改进[J]. 中国电力,2006,39(4):52-55.
Qian Zhiyong, Zhu Yunpeng, Xiong Tihua. Analysis and improvement of operation problems of wind-water combined ash coolers for large-scale CFB boiler [J]. Electric Power, 2006, 39(4):52-55.

[12] 李永茂. 37 t/h 风水联合冷渣器在 300 MW CFB 锅炉的应用[J]. 热力发电,2011,40(6):85-88.
Li Yongmao. Application of 37 t/h air-water combined slag cooler on CFB boiler for 300 MW unit [J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(6):85-88.

[13] 李志刚. 整体水冷结构风水联合冷渣器在循环流化床锅炉的应用[J]. 电站系统工程,2013,29(1):54-56.
Li Zhigang. Application of air-water combined ash cooler with structure of water cooling on CFB boilers [J]. Power System Engineering, 2013, 29(1):54-56.

[14] 钱志永. 440 t/h CFB 锅炉风水联合冷渣器运行问题分析及改进[J]. 热力发电,2006(6):24-28.
Qian Zhiyong. Analysis of operation problems concerning air and water jointly operated slag cooler of a 440 t/h CFB boiler and improvement thereof [J]. Thermal Power Generation, 2006(6):24-28.

[15] 曾兵,方欣. 回收流化床锅炉底渣热量方式对机组热经济性的影响[J]. 应用能源技术,2013(5):11-15.
Zheng Bing, Fang Xin. Influence of CFB boiler bottom ash heat recovery mode on thermal economy of units [J]. Applied Energy Technology, 2013(5):11-15.

[16] 郭涛,杜诚,张志强,等. FAC 型流化床式冷渣器热态试验研究[J]. 锅炉技术,2012,43(2):33-36.
Guo Tao, Du Cheng, Zhang Zhiqiang, et al. Thermal test study on FAC fluidized bed slag cooler [J]. Boiler Technology, 2012, 43(2):33-36.