

5 MW 超临界二氧化碳机组锅炉闭式循环 吹管工艺研究

王林

(西安热工研究院有限公司, 陕西省 西安市 710054)

Research on Closed Cycle Pipe Blowing Technology of 5 MW Supercritical Carbon Dioxide Unit Boiler

WANG Lin

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi Province, China)

摘要: 为探索适用于新型超临界二氧化碳锅炉的蒸气吹管工艺, 以某地5 MW超临界二氧化碳循环发电试验机组为研究对象, 结合主辅机设备特性, 提出并实践了闭式循环吹管方案。该方案借助机组原有的高、低压旁路, 将锅炉系统管道首尾相接完全封闭, 利用循环流动的高压二氧化碳气体连续吹扫杂质, 并用滤网加以捕集。闭式循环吹管方案系统简单, 操作方便, 吹扫质量经打靶检验合格, 有力保障了试验平台的后期试运行工作。针对方案执行初期因滤网频繁堵塞而导致机组停机次数增多的问题, 现场研发并投用了具有在线切换、在线清灰功能的双路过滤器, 显著提高了吹管效率, 降低了吹管成本, 相关经验对于推动超临界二氧化碳循环发电技术的落地产业化具有重要的工程意义。

关键词: 超临界; 二氧化碳; 锅炉吹管; 闭式循环

ABSTRACT: In order to explore the steam pipe blowing process suitable for new supercritical carbon dioxide boiler, taking a 5 MW supercritical carbon dioxide circulating power generation test unit as the research object, the characteristics of main and auxiliary equipment were analyzed, and a closed circulating blowing scheme was proposed and applied. With the help of the original high and low pressure bypass of the unit, the boiler pipeline system is completely closed, the circulating high-pressure carbon dioxide gas is used to continuously wash the pipe wall, and the impurity particles are captured by the filter screen. The closed circulating pipe

blowing scheme has the advantages of simple system and convenient operation. The purging quality has passed the target inspection, which effectively ensures the later commissioning of the test unit. In view of the unit shutdown caused by the frequent blockage of filter screen at the initial stage of scheme implementation, a two-way filter was developed and put into use on site, which can significantly improve the pipe blowing efficiency and reduce the pipe blowing cost. Relevant experience has important engineering reference significance for the infrastructure commissioning of subsequent supercritical carbon dioxide cycle generator units.

KEY WORDS: supercritical; carbon dioxide; boiler pipe blowing; closed cycle

0 引言

电站锅炉在基建过程中, 需要对安装好的受热面汽水管道进行蒸汽吹扫, 清理污物, 以免杂质颗粒进入汽轮机中损伤叶片^[1-2]。国家能源局2013年发布的DL/T 1269—2013《火力发电建设工程机组蒸汽吹管》(以下简称《吹管导则》)为现行的行业标准^[3], 提出了针对水蒸气锅炉的开放式吹管方案, 利用高温高压的蒸汽, 将管道系统内的杂质污物吹出并排向大气。与水蒸气相比, 二氧化碳制备成本较高, 作为典型的温室气体不宜大量排放^[4], 直接排放会危害地表植被与生物健康。因此, 新型二氧化碳锅炉不能简单套用水蒸气锅炉的吹管方案。

超临界二氧化碳(简称S-CO₂)具有黏度小、能

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFF0218104); 国家自然科学基金项目(51806172)。

Project Supported by National Key R & D Program of China (2020YFF0218104); National Natural Science Foundation of China (51806172).

置。燃烧器为顶置、单只、低 NO_x 燃烧器，以下冲方式组织燃烧，设计燃料为天然气。锅炉受热面系统包括垂直下降膜式气冷壁，高、低温过热器，高、低温再热器及分流省煤器等。锅炉总体布局如图2所示。

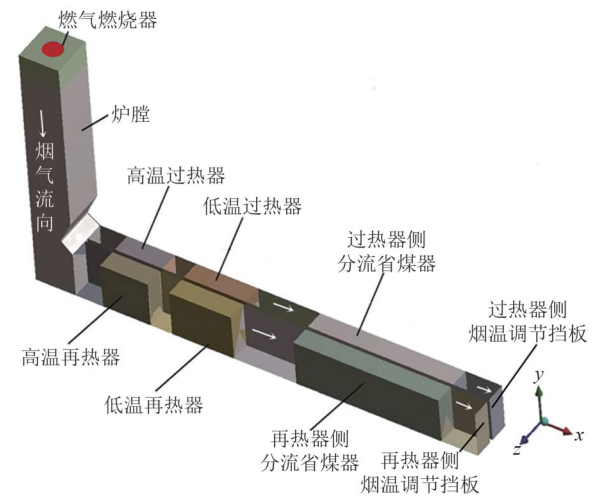


图2 锅炉整体布局

Fig. 2 Overall layout of the boiler

本工程 S- CO_2 锅炉主要设计参数^[6]如表 1 所示。

表1 锅炉主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of the boiler

参数	额定工况数值
过热器流量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	290.4
过热器出口压力/MPa	20
过热器出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	600
再热器流量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	295
再热器进口压力/MPa	15.3
再热器出口压力/MPa	14.7
再热器入口温度/ $^{\circ}\text{C}$	562
再热器出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	600
给气温度/ $^{\circ}\text{C}$	476

注：再热器流量包含高压透平进气量与透平轴端密封气量。

机侧的供气自上而下进入锅炉。分流省煤器与高温回热器所在的主路并联，其流量约为主路流量的 10%。 CO_2 经分流省煤器加热后再进入气冷壁进口集箱前与主路流量混合。混合后的工质从气冷壁进口集箱引入到垂直管圈气冷壁，从气冷壁出口集箱引出的工质进入过热器中加热，达到额定参数的过热 CO_2 被送入高压透平做功。高压透平的排气进入再热器中加热，合格的再热

CO_2 再进入低压透平做功。高低压透平分别设计有各自的旁路系统。工质流动的动力来自压缩机的运转，压缩机采用单缸单段结构，由一台电机带动增速器，通过膜片式联轴节与之连接。压缩机的主要参数如表2所示。

表2 压缩机主要参数

Tab. 2 Main design parameters of the compressor

参数	正常工况数值	额定工况数值
进口压力/MPa	7.90	7.90
进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	35.0	35.0
进口压缩性系数	0.31	0.51
实际进口容积流量/($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	716	1 183
出口压力/MPa	21.50	21.50
出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	96.0	118.0
出口压缩性系数	0.480	0.651
转速/(r/min)	8 267	9 130

2 闭式循环吹管方案

电站锅炉正式投用前，必须对其各级受热面、进出口集箱及联通管道进行蒸气吹扫，以免杂质进入透平，损伤叶片^[7-8]。《吹管导则》提出了适用于水蒸气锅炉的降压法和稳压法吹扫方案，2 种方案均采用开放式吹扫，系统内的杂质被蒸气冲刷携带，经对空排放口最终排入大气。

2.1 方案提出

因为除盐水价格低廉，水蒸气无毒无害，大量排放也不会对环境及生物造成威胁，所以水蒸气锅炉采用开放式方案是合理的。

二氧化碳的成本高、密度大，若简单套用水蒸气锅炉开放式的吹扫方案，一是吹管消耗的工质量大，引起吹管成本的上升；二是向大气中大量排放二氧化碳，与“碳达峰”的目标相违背，环保意义差^[9-11]；三是高浓度的二氧化碳沉降后，对排放点处地表的植被、生物具有较大危害。因此，超临界二氧化碳锅炉不适合采用外排开放式的吹管方案。

某 5 MW 试验机组系统构成简单，高低压透平容易隔离，借助透平旁路管道即可实现待吹系统的完全封闭，因此实施闭式循环吹扫具有成本低、操作简便、安全经济等优点，只要滤网设置合理，一样可以获得优良的吹扫效果。为保证压

缩机设备的正常平稳运行,采用稳压法对试验台闭式管道系统进行吹扫。

2.2 方案详情

2.2.1 吹扫范围

吹扫的范围主要包括:气冷壁、分流省煤器、过热器、主气管道、高旁阀前后管道、再热冷段管道、再热器、再热蒸气管道、低旁阀前后管道、高温回热器、低温回热器、预冷器前后管道、压缩机进出口管路、稳压罐进出口管路等。吹管临时系统如图3所示。

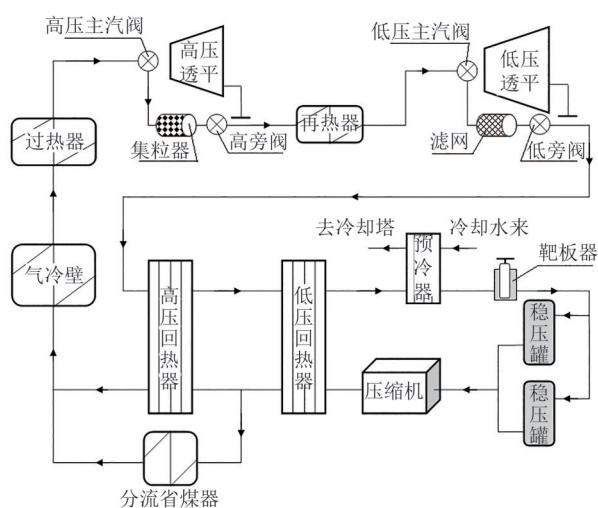


图3 闭式二氧化碳循环吹扫系统图

Fig. 3 Carbon dioxide closed cycle purging system diagram

2.2.2 吹扫流程

本锅炉过热器、再热器及相关管道采用一步法串联闭式吹扫。通过设置吹管临时管路及措施,实现过热器、再热器的串联吹扫。

吹扫主要流程如下:气冷壁→过热器→主气管道→高旁阀前管道→集粒器→高旁临时阀→高旁阀后管道→再热器冷段管→再热器→再热器热段管→低旁阀前管道→临时滤网→低旁临时阀→低旁阀后管道→高温回热器低压侧→低温回热器低压侧→预冷器→临时手动门及管路→靶板器→单路过滤器→CO₂稳压罐→压缩机→低温回热器高压侧→高温回热器高压侧→气冷壁出口。另外,自低温回热器至高温回热器高压侧管路引出一路工质至分流省煤器,与高温回热器高压侧出口工质在气冷壁入口汇合,一并进入气冷壁中。

本次吹扫过程分为冷态及热态两阶段,两阶段的吹扫系统布置完全相同。

冷态吹扫阶段,系统建立二氧化碳工质循环后,逐步增大系统流量,对管路进行大流量连续吹扫,清理出较大的颗粒杂质。

热态吹扫阶段,锅炉点火,工质升温升压,根据初步测算,工质流量达到300 t/h,过热器出口气体参数10 MPa/450 °C时,可满足系统吹管系数>1的要求。具体参数将根据分布式控制系统画面实时显示的吹管系数,进行针对性的调整。

2.2.3 临时措施

为满足锅炉及相关管道的吹扫要求,隔离不参与吹扫的部分设备,保证吹扫效果及设备安全^[12],需采取如下的临时措施:

1) 在高低压透平进气阀前、排气阀后断开,分别加堵板,防止吹扫合格前工质进入透平。

2) 高旁阀后正式管路接临时管引出,布置吹扫用集粒器及高旁临时控制阀,阀后接临时管至高旁阀后正式管路。

3) 低旁阀后正式管路接临时管引出,布置吹扫用滤网、低旁临时控制阀,阀后接临时管至低旁阀后正式管路。

4) 高旁临时控制阀和低旁临时控制阀使用正式高旁、低旁阀体及执行器,阀芯采用临时吹扫用阀芯,吹管完成后更换为正式阀芯。

5) 预冷器出口至稳压罐间布置临时管道替换原设计正式管路,依次布置临时手动门、靶板器及过滤器,完成吹管打靶检验工作。其中过滤器前后设置远传差压变送器,并布置临时泄压管路,供清理滤网及拆装靶板时泄放工质使用。吹管完成后,预冷器出口至稳压罐间恢复正式管路。

6) 稳压罐至压缩机入口间管道临时布置手动门2个、滤网2个,同时滤网前后设置远传差压变送器及临时泄压管路,供清理滤网时泄放工质使用。

7) 吹扫所用临时管道内部应做喷砂处理,采用氩弧焊打底施焊。

8) 吹扫临时管应安装牢固可靠的支吊架,充分考虑管道的径向、轴向热膨胀和吹扫时的反作用力,其强度应按大于4倍的吹管反作用力进行

计算,临时系统应由具有资质的单位进行受力校核计算。

9) 吹管临时系统管路使用前须经光谱检查或其他工艺检查,确保材质符合设计要求。

10) 吹扫的临时管道需进行保温。

11) 临时管道宜采用Y型的汇通三通,两管之间夹角宜选择 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的锐角。

12) 临时管选择内径大于或等于原正式管道内径的管子。高低压旁路按14.5 MPa、不小于 450°C 的使用要求选取管材。稳压罐入口段临时管路采用与正式管路相同材质的钢材。

13) 靶板器的制作按照《火吹管导则》中的要求进行。靶板采用铝板制作,其宽度为排汽管内径的8%且 $\geq 25\text{ mm}$,厚度 $\geq 5\text{ mm}$,长度纵贯管子内径,表面应进行抛光处理,无肉眼可见斑痕。

14) 吹管结束后恢复管道时,须采取可靠措施,避免杂质污物再次进入吹扫过的管路。

2.2.4 方案实施

锅炉点火后,逐步升温升压,热工专业投入主、再热器吹管系数计算模块,实时显示吹管系数。

机组吹管系数参考现行行业导则,定义为吹扫工况和锅炉额定出力(boiler rated load, BRL)工况下气体动量之比,表达式为

$$K = G^2 \times C / (G_m^2 \times C_m) \quad (1)$$

式中: K 为吹管系数; G 、 G_m 分别为吹扫工况和BRL工况下管路内二氧化碳气体的流量; C 、 C_m 分别为2种工况下气体的比热容。

锅炉逐步增加燃气量至 $1\,139\text{ m}^3/\text{h}$,主蒸气参数达到 $399.5^{\circ}\text{C}/10.5\text{ MPa}$,再热蒸气参数达到 $400^{\circ}\text{C}/9.2\text{ MPa}$,此时锅炉进口工质流量为 230 t/h ,排烟温度为 71°C ,过热器吹管系数达到0.99,再热器吹管系数达到0.84。

继续增加压缩机出力,提高工质流量,过热器吹管系数达到1.01,再热器吹管系数达到1.00,系统进入正式吹扫阶段。

吹扫2 h后,因滤网差压大,系统报警,工质流量出现下降趋势,判断滤网严重堵塞,锅炉停机。停机后,拆下的滤网发生严重变形(如图4所示),需更换新的滤网。



图4 堵塞的滤网

Fig. 4 Clogged screen

锅炉再次点火后,继续升温升压,对系统实施大流量吹扫,因管内杂质较多,滤网又发生多次堵塞,导致停机。拆卸滤网管道时不得不将工质二氧化碳全部排空,这造成了极大的浪费,同时因滤网反复更换,也延长了吹管工期,使得现场各项成本大大增加。

2.2.5 双路过滤器投用

为解决因滤网堵塞而导致停机次数增多的问题,现场设计了可在线切换、在线清灰的双路过滤器,布置在预冷器出口、稳压罐前端,该双路过滤器构造如图5所示。

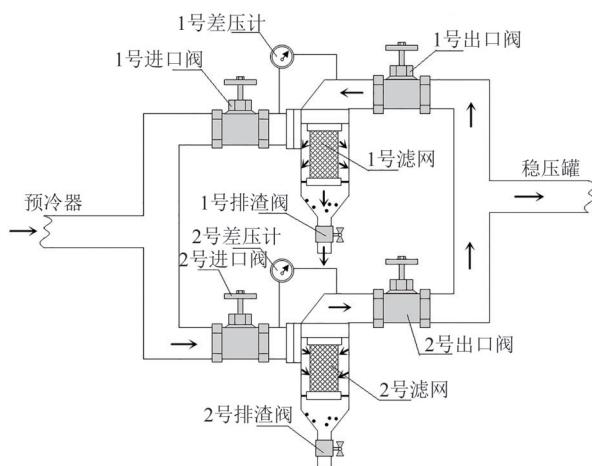


图5 双路过滤器

Fig. 5 Two-way filter

上述过滤器专用于超临界二氧化碳循环发电机组闭式循环吹管。装置采用双路布置,当1号滤网差压增大到报警值时,即判断为该滤网堵塞,在不停机的情况下,直接启用2号滤网,完成滤网的在线切换,吹管过程不中断。已堵塞的1号滤网则执行清灰操作:关闭进口阀,打开出口阀,再打开排渣阀,实现滤网逆向进气,反吹清污。

反吹一定时间后,即可关闭进出口阀门,2号滤网恢复备用。启用双路过滤器,既避免了滤网过早变形报废,延长了滤网使用寿命,又实现了不停机的滤网复原,这大大提高了闭式循环吹管的吹扫效率,缩短了工期,降低了成本。

2.2.6 打靶验收

启用双路过滤器后,机组稳压闭式吹管有效吹扫时间显著提升,滤网差压增大至某一值后基本维持稳定,则可判断系统内杂质已冲刷干净。为进一步优化系统阻力,提高吹管系数,集粒器在此阶段全部拆除。

停炉冷却20 h后,靶板器加装1号靶板,锅炉点火,重新升温升压。

逐步增加燃气量至 $1\,105\text{ m}^3/\text{h}$,工质流量达到 253 t/h ,主气参数达到 $12.3\text{ MPa}/450\text{ }^\circ\text{C}$,再热气参数达到 $10.7\text{ MPa}/448\text{ }^\circ\text{C}$,此时过热器吹管系数达到1.26,再热器吹管系数达到1.14。

吹扫2 h后,锅炉停炉,压缩机停机,取出1号靶板,并换装2号靶板。

锅炉重新点火,达到稳压吹管参数后继续吹扫1 h。吹扫完成后,锅炉停炉,取出2号靶板。

经现场各方联合确认,2块靶板表面均无直径大于 0.8 mm 的斑痕,直径 $0.2\sim 0.8\text{ mm}$ 的斑痕数4个,靶板合格,试验机组吹管工作顺利完成。

本次吹管工期共计10天,由于园区天然气供应采取每日定额方式,因此试验台连续运行时间有限,故采取了早上点火、下午停炉的工作安排。吹管期间,平均每天正式稳压吹扫时间为 $3\sim 4\text{ h}$,初期滤网频繁堵塞,增加了停机次数,后期使用双路过滤器,有效缩短了吹管工期。

3 结论

1) 新型锅炉不能套用水蒸气锅炉的开放式吹扫方案。开放式的二氧化碳吹扫方案物料成本高、环保意义差、安全隐患大,不具备实际的可行性。

2) 封闭式的二氧化碳吹扫方案施工简单,吹扫范围广泛,启用双路过滤器后,有效延长了滤网使用寿命,减少了停机次数,提高了吹管效率。

3) 新型锅炉的吹管验收标准可以参考现有水蒸气锅炉相关规范。试验机组吹管期间停炉大于

3次,每次时间均超过12 h,最后按照现行标准验收合格。后续整套启动及满负荷试运行期间,机组运行稳定,各项指标优良,表明现行标准具有较好的适应性。

参考文献

- [1] 部俊锋,赵阳德,刘希健.高效超超临界机组的高效降压吹管方案[J].锅炉技术,2020,51(4):15-19.
BU J F, ZHAO Y D, LIU X J. High efficiency method of reduced pressure steam blowing for high efficiency ultra-supercritical unit[J]. Boiler Technology, 2020, 51(4): 15-19.
- [2] 王林,王红雨,高景辉,等.1 000 MW机组蒸汽管道氧化皮吹扫工艺研究[J].热力发电,2020,49(2):93-98.
WANG L, WANG H Y, GAO J H, et al. Study on blowing process of oxide skin of steam pipeline in a 1 000 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 93-98.
- [3] 国家能源局.火力发电建设工程机组蒸汽吹管导则:DL/T 1269—2013[S].北京:中国电力出版社,2014.
National Energy Administration. Guidelines for steam blowing of thermal power generation construction projects: DL/T 1269—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [4] 刘晴晴,叶佳璐.浅析二氧化碳捕集储存技术研究进展[J].当代化工研究,2021(18):160-161.
LIU Q Q, YE J L. Analysis on the research progress of carbon dioxide capture and storage technology[J]. Modern Chemical Research, 2021(18): 160-161.
- [5] 唐鑫,钱奕然,方华伟,等.超临界二氧化碳布雷顿循环控制策略研究综述[J].发电技术,2023,44(4):492-501.
TANG X, QIAN Y R, FANG H W, et al. A review of control strategies for supercritical carbon dioxide Brayton cycle[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 492-501.
- [6] 苏宏亮,黄莺,殷亚宁,等.5 MW超临界二氧化碳实验锅炉热力特性与壁温耦合计算模型[J].热力发电,2020,49(10):151-156.
SU H L, HUANG Y, YIN Y N, et al. Coupled calculation model of thermal characteristics and metal temperature of a 5 MW supercritical carbon dioxide boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 151-156.

- [7] 王林, 刘辉, 刘超, 等. 二次再热机组锅炉三段吹管技术研究[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 69-73.
WANG L, LIU H, LIU C, et al. Technical study on three-staged pipe-blowing method used in double reheat unit[J]. Electric Power, 2017, 50(7): 69-73.
- [8] 王林, 刘辉, 李康, 等. 1 000 MW 二次再热塔式炉三段吹管新工艺[J]. 陕西电力, 2016, 44(10): 82-85.
WANG L, LIU H, LI K, et al. Application of three-section steam purging technology in 1 000 MW double-reheat tower typer boiler[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(10): 82-85.
- [9] 赵国涛, 钱国明, 王盛, 等. “双碳”目标下火电企业绿色低碳转型的对策分析[J]. 华电技术, 2021, 43(10): 11-21.
ZHAO G T, QIAN G M, WANG S, et al. Analysis on solution for green and low-carbon transformation of thermal power enterprises to achieve carbon peak and carbon neutrality[J]. Huadian Technology, 2021, 43(10): 11-21.
- [10] 杨萃. 碳达峰和碳中和对火电企业的影响及对策研究[J]. 投资与创业, 2020, 31(23): 147-149.
YANG C. Study on the influence of carbon peaking and carbon neutralization on thermal power enterprises and countermeasures[J]. Investment and Entrepreneurship, 2020, 31(23): 147-149.
- [11] 孙漪清. 火电机组二氧化碳减排策略研究[J]. 化工管理, 2017(35): 242-245.
SUN Y Q. Research on carbon dioxide emission reduction strategy of thermal power units[J]. Chemical Management, 2017(35): 242-245.
- [12] 高景辉, 王林, 杨博, 等. 国内首台二次再热机组锅炉混合吹管实践及优化[J]. 热力发电, 2017, 46(8): 107-112.
GAO J H, WANG L, YANG B, et al. Practice and optimization of combined pipe-blowing method for domestic first double-reheat unit[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(8): 107-112.

收稿日期: 2022-03-26。

作者简介:



王林

王林(1989), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为大型火电机组启动调试及运行优化, wanglina@tpri.com.cn。

(责任编辑 辛培裕)