

超临界锅炉启动分离器疲劳寿命分析

张 莹,程 毅,袁志平,周志磊
(南昌大学 机电工程学院,江西 南昌 330031)

摘 要: 通过创建启动分离器的三维实体模型,运用有限元方法模拟超临界直流锅炉的启动分离器在机组冷态启动过程中的温度分布和峰值应力,分析了启动分离器冷态启动中的寿命损耗。结果表明:启动分离器启动过程中,温度最高的区域出现在汽水引入管与启动分离器内部相接处,启动分离器内、外壁温差会大于汽水引入管的内、外壁温差;最大峰值应力出现在汽水引入管和分离器筒体切向出口部位;疲劳应力损坏发生在应力集中部位,其修正后的应力幅对应的循环次数为 12 700 次,远大于锅炉寿命期内的冷态启动次数,可以确保锅炉安全启动和运行。

关 键 词: 启动分离器;冷态启动;温度场;应力场;寿命损耗

中图分类号:TK223.4;TK225 文献标识码:A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.01.011

引 言

超临界锅炉为了在启动阶段对炉膛提供安全所需的给水量,必须设置启动系统,而启动分离器则是启动系统中的重要部件。启动分离器属于锅炉炉外承压部件,造价较高,如果分离器损坏那么直流锅炉也就不能使用了。提高锅炉的启动速度能提高机组的效益,但是提高启动速度就意味着缩短启动时间,这样会对锅炉承压部件产生很大的热应力从而影响部件的性能。反之,如果延长启动时间,虽然能提高厚壁部件的安全性,却会降低机组的经济性^[1-4]。当前国内外的发电技术特别是在锅炉部件的技术应用上还在不断更新^[1-3],我国的超临界机组发电技术发展迅猛^[4-7],机组设备的安全运行一直是发电技术研究领域的重要课题,而对于超临界锅炉启动

分离器应力特性和疲劳寿命相关领域的研究还是较少的,不同超临界锅炉机组的启动分离器型号、性能各异,所以启动分离器的研究也逐渐受到关注^[8-11]。

超临界锅炉承压部件在各种启动过程中的寿命损耗研究,对于火电机组的安全启动、结构优化和效益的综合评价具有积极意义^[12]。因此本研究以东方锅炉厂生产的某型超临界直流锅炉的启动分离器(主要材料为 SA-336F12 钢)为研究对象,对机组冷态启动过程的峰值应力和疲劳寿命进行数值模拟和计算,为超临界锅炉启动分离器的安全启动提供了有力的理论基础,并对进一步研究 SA-336F12 钢的应用性能做了铺垫。

1 数值模拟及计算方法

1.1 启动分离器材料物性参数

东方锅炉厂生产的 600 MW 超临界锅炉的启动分离器为垂直设置、筒式结构,汽水分离采用旋风重力分离的方式,布置在锅炉水冷壁集箱的工质出口处。启动分离器的金属材料为 SA-336F12 钢^[13],其物性参数如表 1 所示。

1.2 启动过程工质变化情况

在超临界锅炉冷态启动的过程中,工质受热温度在不断地发生变化,图 2 为锅炉冷态启动过程中工质温度及工质压力的变化情况。启动分离器的启动过程中工质的温度变化主要是在启动 800 min 内,计算模拟了这一时间段内启动分离器的温度变化及分布,并计算出这一阶段内不同工质分别在单相水阶段、汽水混合阶段及蒸汽阶段的换热系数。

收稿日期:2014-11-21;修订日期:2015-01-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51066005)

作者简介:张莹(1970-),女,江西南昌人,南昌大学教授。

表 1 SA-336F12 钢的物性参数

Tab.1 SA-336F12 material's physical parameters

钢材温度 $T/^\circ\text{C}$	导热系数 $\lambda / \text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	线膨胀系数 $\alpha / 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$	比热容 $C_p / \text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	弹性模量 $E / 10^5\text{MPa}$
20	36.9	0.97	440	2.09
100	37.9	1.07	490	2.03
200	37.9	1.18	530	1.97
300	37.1	1.28	570	1.89
400	35.5	1.35	610	1.82
500	33.8	1.40	670	1.74
600	31.9	1.44	750	1.65

注: SA-336F12 钢密度 ρ 为 7830 kg/m^3 , 屈服极限 σ 为 275 MPa , 泊松比为 0.3 。

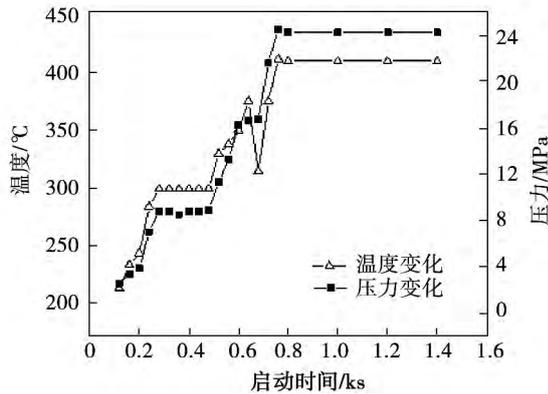


图 2 启动分离器启动过程中工质温度、压力变化曲线

Fig.2 Fluid temperature and pressure changing curve of the working start-up separator

1.3 换热系数计算

计算冷态启动后启动分离器 800 min 内筒体和汽水引入管两部位 3 个阶段的换热系数。为了更准确地计算换热系数,采用 Gnielinski 公式^[14]:

$$Nu_f = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr_f}{1 + 12.7\sqrt{f/8}(Pr_f^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d}{l}\right)^{2/3} \right] c_t \quad (1)$$

式中: l —计算管长, m; f —管内湍流流动的 Darcy 阻力系数; 流体 $c_t = (Pr_f/Pr_w)^{0.01}$, $Pr_f/Pr_w = 0.05 - 20$; 气体 $c_t = (T_f/T_w)^{0.45}$, $T_f/T_w = 0.5 - 1.5$ 。

1.4 启动分离器的运行和疲劳损伤特性

启动分离器运行过程中产生的应力是随时间变化的,在启动分离器的汽水入口处容易产生应力集中现象,这些部位在运行过程中会产生很高的应力,

其材料疲劳寿命要低于其它部位。利用没有裂纹的光滑试样在一系列的循环应力载荷下的疲劳实验来评估材料低周疲劳损耗,测得这些光滑试样断裂所需要的载荷循环次数,得到应力载荷与寿命时间的关系曲线($\sigma-N$ 曲线),然后计算出材料部件受到的应力幅,就可以在曲线上找到对应失效的循环次数。为了满足启动分离器材料疲劳分析的要求,利用了英国 BS5500 疲劳曲线^[15],其设计疲劳曲线对平均应力作了充分地考虑,并采用第三强度理论进行强度校核^[16]。

2 结果与分析

2.1 启动分离器内、外壁面温度

经过计算得出启动分离器内、外壁面温度的变化和启动分离器整体在某个时间点的温度分布情况。

启动分离器中的温度变化主要集中在启动开始后的 800 min 内,图 3 为启动后第 800 min 时的温度分布。温度最高的区域在汽水引入管与启动分离器内部相接处,且引入管与分离器的内壁温度均高于外壁温度。此外,启动分离器内、外壁温差大于汽水引入管的内、外壁温差,这说明汽水引入管部位的换热更充分。

图 4 为启动分离器在冷态启动过程中筒体内、外壁温度及温差随时间变化的情况,启动分离器内、外壁在启动过程中温度逐渐升高且在启动初期其温度的上升速率最快,内、外壁的温差也在启动初期时最大,之后温差减小并有相应的起伏。图 5 为汽水引入管在冷态启动过程中内、外壁温度随时间变化的情况,汽水引入管温度和温差的变化情况与启动分离器筒体是一致的,但是引入管的温差总体上比筒体的要小。在启动初期启动分离器温度上升较快,内、外壁温差较大,可能是因为在启动初期锅炉内的火焰与给水温差大,水温迅速升高从而使得启动分离器的温度上升较快,内、外壁形成较大温差。

2.2 启动分离器峰值应力

间接热应力耦合法是在已知计算对象初始温度条件的情况下先进行温度分布的模拟计算,求得各个单元节点上的温度,然后将这些节点温度值作为热应力分析中的载荷进行热应力分布的模拟。对启动分离器的热应力分析,考虑模型边界、初始条件以

及温度分布 采用间接热应力耦合法。把模型的热单元转换为应力单元,即把三维热实体 SOLID70 单元转换为应力结构单元 SOLID185,并在各个截面施加相应的约束条件,约束模型的上、下截面 Y 轴方向的位移,约束模型左右 2 个截面 X、Z 轴方向的位移。

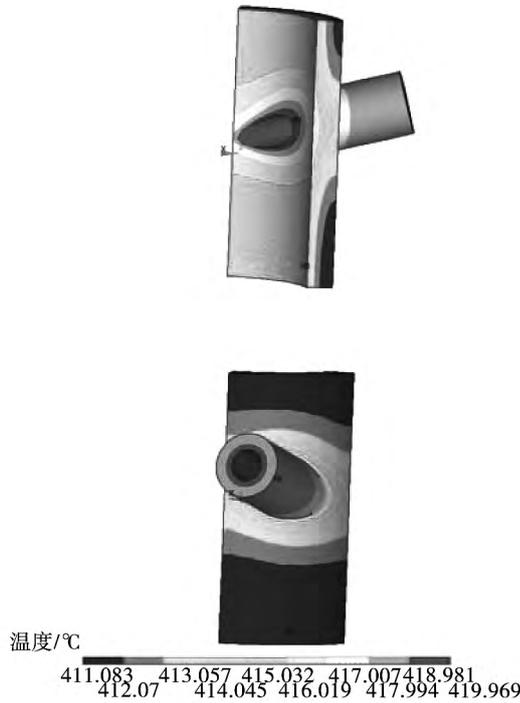


图 3 启动 800 min 时启动分离器温度分布
Fig. 3 The temperature distribution of the start-up separator at 800 min

图 6 为启动分离器在工质温度和压力共同作用下,峰值应力分布情况。峰值应力最大点是节点 1 处,位于启动分离器引入管和筒体切入口的内壁相接线的偏上部位,峰值应力最大值达到了 310.158 MPa,此时汽水引入管受到的峰值应力较小,启动分离器内壁的峰值应力整体要大于外壁的峰值应力,而且峰值应力较大的部位主要集中在引入管切入口附近。

2.3 启动分离器疲劳寿命

产生疲劳损伤的部位通常是处于构件的断裂焊接部位或者是表面已有裂纹或具有一定缺陷部位,对于锅炉蒸汽管道,疲劳应力损坏容易发生在应力集中的部位。超临界锅炉运行负载小于 35% 锅炉最大连续蒸发量 (BMCR) 工况时,工质受到加热后

形成汽和水进入启动分离器,分离出来的水由于重力作用从分离器下部再进入锅炉加热系统^[17],饱和蒸汽则从上部引入烟道过热器中继续受热,当锅炉运行负载超过 35% BMCR 时,锅炉进入干态状况运行,此时就没有水分进入分离器,而启动分离器的作用和普通的蒸汽管道一样。

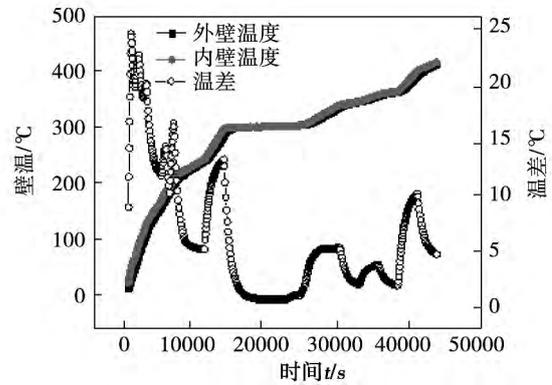


图 4 分离器筒体内、外壁温度及温差曲线
Fig. 4 The temperature and the temperature curve of the outer wall of cylinder body inside and outside the separator

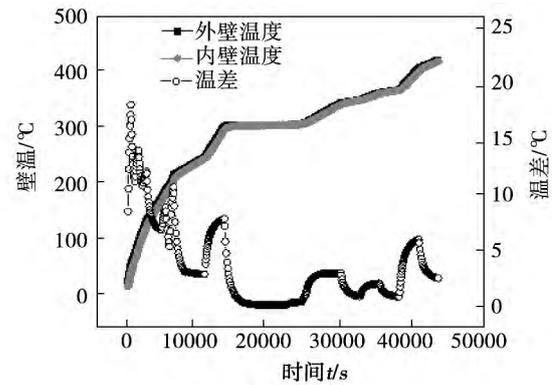


图 5 引入管内、外壁温度及温差变化曲线
Fig. 5 The temperature of the outer wall and the curve of the temperature changing

利用设计疲劳曲线来计算启动过程启动分离器的应力疲劳损耗,采用英国 BS5500 疲劳曲线标准估算启动分离器的寿命损耗。根据启动分离器在冷态启动过程中热应力和峰值应力的分布,确定了启动分离器的危险点所在位置以及危险点的最大承受应力值。计算启动分离器冷态启动过程中受到的最大循环应力幅 δ_{aij} ,已知最大受力点应力值 $SINT_{max}$ 为 310.158 MPa,最小应力强度 $SINT_{min}$ 出现在刚开

始启动时, 应力值为 0 MPa。计算式为:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{aij}} &= \frac{1}{2}(SINT_{\text{max}} - SINT_{\text{min}}) \\ &= 155.079 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (2)$$

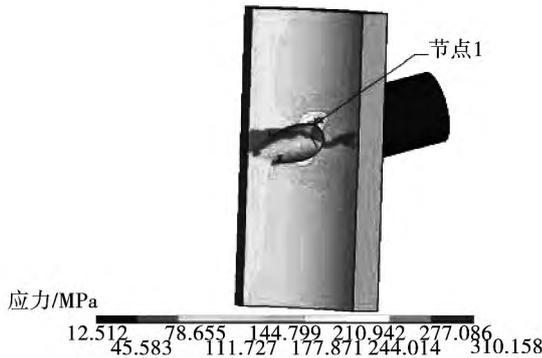


图 6 峰值应力变化曲线
Fig. 6 Peak stress changing curve

对最大应力幅进行修正, 此时启动分离器的温度约为 400 °C, 其弹性模量值 E_d 为 1.82×10^5 MPa, 应力幅修正计算式为:

$$\delta_a = \frac{E}{E_d} \delta_{\text{aij}} = 175.529 \text{ MPa} \quad (3)$$

修正后的应力幅对应的循环次数 $N = 1.27 \times 10^4$ 次, 按锅炉在 50 年运行期间内冷态启动 660 次计算, 此次冷态启动过程中的应力疲劳损耗为 $\frac{660}{N} = 0.0520$, 即应力疲劳寿命损耗率为 $\eta = 5.20\% < 1.0$, 其损耗程度还是较小, 可以确保锅炉安全运行。

3 结 论

(1) 在锅炉长时间停炉冷态启动过程中, 工质的温度和压力是随时间持续改变的, 工质出现了单相水、汽水混合及蒸汽 3 种状态的换热, 换热系数的大小直接影响了温度分布的结果。

(2) 在工质温度变化的过程中, 内、外壁的温差受到壁厚的影响, 筒体的内、外壁温差整体要大于引入管的内、外壁温差, 但随着启动过程的结束, 工质温度稳定, 最后启动分离器整体的温度将大体一致。

(3) 启动分离器冷态启动过程中应力主要集中在汽水入口的内相接线及附近部位, 单次的启动分离器正常冷态启动过程中 SA-336F12 钢的应力疲劳寿命损耗率小于 1, 故对其寿命的损耗影响并

不大。

参考文献:

[1] 宋智晨, 贺在华, 段嘉宣, 等. 2014-2018 年中国发电设备行业投资分析及前景预测报告[R]. 深圳: 中投顾问, 2014. SONG Zhi-chen, HE Zai-hua, DUAN Jia-xuan, et al. Investment analysis and forecast report of China power equipment industry from 2014-2018 [R]. Shenzhen: The consultant, 2014.

[2] Purbolaksono J, Ahmad J, Beng L C, et al. Failure analysis on a primary super heater tube of a power plant [J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(1): 158-167.

[3] Li N, Yan W P, Ye F, et al. Creep-fatigue interaction life prediction for P91 steel based on improved Elman neural network model [J]. Advanced Materials Research, 2012 (535-537): 674-677.

[4] 王潇晨, 董克昌, 牟明辉. 1 100 MW 超超临界发电机组气力除灰系统设计 [J]. 电站系统工程, 2014, 30(1): 30-32. WANG Xiao-chen, DONG Ke-chang, MOU Ming-hui. Design of pneumatic ash handling system for 1 100 MW Ultra-supercritical Units [J]. Power System Engineering, 2014, 30(1): 30-32.

[5] 李志郢, 李宜鹏, 王泽浩. 苏制 K-300-240 型超临界发电机组汽轮机调节系统的改造 [J]. 电站系统工程, 2013, 29(2): 53-55. LI Zhong-ying, LI Yi-peng, Wang Ze-hao. Retrofit of governing system of K-300-240 type supercritical turbo-generating unit [J]. Power System Engineering, 2013, 29(2): 53-55.

[6] 我国超超临界发电技术自主化进程全面加快 [J]. 电力与能源, 2013(5): 444. The speeding up of supercritical generating technology of independent process in China [J]. Power & Energy, 2013(5): 444.

[7] 赵志丹, 党黎军, 刘超, 等. 超(超)临界机组启动运行与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012. ZHAO Zhi-dan, DANG Li-jun, LIU Chao, et al. Ultra (ultra) start operation and control of Supercritical Unit [M]. Bei Jing: Chinese Power Press, 2012.

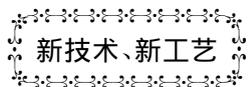
[8] 李娜, 阎维平, 马良玉. 基于 Elman 神经网络的超超临界机组汽水分离器应力在线软测量模型 [J]. 动力工程学报, 2012, 32(10): 747-752. LI Na, YAN Wei-ping, MA Liang-yu. Stress soft-sensing model for steam-water separator of ultra Supercritical Boilers Based on Elman Neural Network [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(10): 747-752.

[9] 杨震, 史英铨. 1913 t/h 超临界锅炉启动分离器的结构强度与寿命研究 [J]. 动力工程, 2006, 26(4): 462-466. YANG Zhen, SHI Ying-quan. Structural strength and life expectancy of the 1913 t/h supercritical boiler's start-up separator [J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(4): 462-466.

[10] 卢征然, 亓安芳, 惠晓涛, 等. 1 000 MW 超超临界锅炉启动分离器制造工艺研究 [J]. 发电设备, 2007(3): 231-234+241. LU Zheng-ran, QI An-fang, HUI Xiao-tao, et al. On Manufacturing

- Technology of the Start-up Separator of a 1000 MW Ultra-Super-critical Boiler[J]. Power Equipment 2007(3):231-234+241.
- [11] 朱宝萍. 超超临界锅炉启动分离器的制造与检验控制[J]. 锅炉技术 2009 40(4):63-66.
- ZHU Bao-ping. The fabrication and inspection of the ultra-super-critical separator[J]. Boiler Technology 2009 40(4):63-66.
- [12] 郑心伟 孙 瑜 王晓军. 增压锅炉汽包低周疲劳寿命计算方法研究[J]. 热能动力工程 2010 25(2):184-186.
- ZHENG Xin-wei ,SUN Yu ,WANG Xiao-jun. Study of methods for calculating the low cycle fatigue life of a supercharged boiler drum [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2010 , 25(2):184-186.
- [13] Gandy D. The grades 11 and 12 low alloy steel handbook [M]. California: Electric Power Research Institute 2007.
- [14] 杨世铭 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006 , 246-248.
- YANG Shi-ming ,TAO Wen-quan. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press 2006 246-248.
- [15] 中国动力工程学会主编. 火力发电设备技术手册(第一卷) [M]. 北京: 机械工业出版社 2000.
- Chinese Power Engineering Society. Thermal power generation technical manual (The first volume) [M]. Beijing: Machinery Industry Press 2000.
- [16] 李建国. 压力容器设计的力学基础及其标准应用 [M]. 北京: 机械工业出版社 2004.
- LI Jian-guo. Pressure vessel design mechanical foundation and standard application [M]. Beijing: Machinery Industry Press 2004.
- [17] 段永成. 国产 600 MW 超临界机组直流锅炉启动系统 [J]. 热能动力工程 2005 20(1):99-101.
- DUAN Yong-cheng. Start-up system of a chinese-made 600 MW supercritical once-through boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2005 20(1):99-101.

(丛 敏 编 辑)



CMI Energy 的余热锅炉

据《Gas Turbine World》2015年5-6月刊报道 现在余热锅炉结构方案主要有2种,在美国传统的卧式布置结构受到青睐,然而在欧洲和亚洲通常使用的是立式布置结构。

自1817年公司建立起,CMI Energy公司已经有600多台余热锅炉在全世界运行,其特点是使用了高温技术(高的压力和高达600℃的再热温度)和用于联合循环装置的快速启动设计,该技术可满足机组频繁起停的要求,并保持装置的总寿命。循环装置能够在11 MW/min的瞬变启动和停机。

在使用管道补燃时,通常认为卧式布置结构具有优点。但是,立式的布置结果改变了这种看法,因为立式方案改进了可接近性、在它的传热面内部布置时具有更大的灵活性、排除了用起重机把组件吊入适当位置的需要,并具有更大的弹性。此外,对于燃烧重油的装置,立式余热锅炉是更合适的,这是因为它们更容易利用吹灰器清洗。

两种余热锅炉布置方案之间最显著的差别是在装置的施工可能性方面。

不是使用大型起重机把各个组件吊入适当位置,而是使用拖车和临时的液压千斤顶,并利用一系列顶悬杆悬挂各个组件,从省煤器开始把立式余热锅炉的各个组件提升装入适当的位置。

与卧式余热锅炉比较,立式余热锅炉集箱的设计和布置以及锅炉锅筒的布置大大地简化了安装过程并减少了现场焊接的数量。

管子、部件和其它组件的高度工厂化集成减少了安装每一台立式余热锅炉所需的时间和现场施工的劳动量。集成预制也减少了长距离移动大量原材料的后勤问题。

(吉 桂 明 摘 译)

Branch ,Hebei Electric Power Prospecting and Designing Research Institute ,Shijiazhuang ,China ,Post Code: 050000) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(1) . -59 -65

Based on the fluid piping network calculation theory ,established was a 600 MW supercritical boiler spirally-coiled tube water wall flow network system composed of flow rate loops ,pressure nodes and connection pipes. According to the law of mass ,momentum and energy conservation ,a mathematical model for calculating the flow rate and wall temperature of spirally-coiled tube water walls of 600 MW supercritical boilers. The quasi-Newton method was used to seek solutions to the flow rate loop and node equation group and a calculation program was developed to obtain the flow pressure drop ,flow rate distribution and wall temperature characteristics inside a spirally-coiled tube water wall at various loads. It has been found that at a load of 100% ,75% and 30% BMCR (boiler maximum continuous rating) ,both thermal and flow rate deviation are relatively small ,the thermal deviation being maximally 5 °C and the flow rate deviation being maximally 7.47% . The flow pressure drop is in relatively good agreement with the design value. The wall temperature of the water wall will increase with an increase of the height ,the highest wall temperature being 469.4 °C . The tube wall temperatures at various loads are invariably below the allowable temperature for the tube material. **Key words:** supercritical boiler ,flow network system ,spirally-coiled tube water wall ,flow rate distribution ,wall temperature

超临界锅炉启动分离器疲劳寿命分析 = Analysis of the Fatigue Life of a Separator for Starting Up a Supercritical Boiler [刊 ,汉]ZHANG Ying ,CHENG Yi ,YUAN Zhi-ping ,ZHOU Zhi-lei (College of Eelectro-mechanical Engineering ,Nanchang University ,Nanchang ,China ,Post Code: 330031) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(1) . -66 -70

A three-dimensional entity model for startup separators was established and the finite element method was employed to simulate the temperature distribution and peak stress of a separator for starting up a supercritical once-through boiler during its cold-state startup period and analyze the service life loss in the process of the cold-state startup of the separator. It has been found that during the startup period of the separator ,the highest temperature zone emerges at a location to connect the steam-water lead-in tube inside the separator and the temperature difference between the inner and outer wall of the separator is greater than that of the steam-water lead-in tube. The maximum peak stress emerges at a location of the port on the shell of the separator in the tangential direction opened for the steam-water lead-in tube. Damages caused by the fatigue stress always occur at locations subjected to a stress concentration and

the number of cycles or frequency corresponding to the stress amplitude corrected totals 12700 ,far greater than the frequency for starting up the boiler from the cold state during its service life period ,therefore ,ensuring that the boiler is always safe during its start-up and operation period. **Key words:** startup separator ,cold-state startup ,temperature field ,stress field ,life characteristics

变工况下超超临界机组抽汽过热度利用方案的比较分析 = **Comparison and Analysis of the Superheating Degree Utilization Versions for a Ultra-supercritical Unit Under the Off-design Operating Conditions** [刊 , 汉] LIU Ying-hua (Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co. Ltd. ,Beijing ,China ,Post Code: 100025) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(1) . -71 -75

In the light of the problem that the superheating degree of the recuperative steam extracted in the thermal systems of large-sized ultra-supercritical units is excessively high ,studied were the specific features of the change in the superheating degree of the steam extracted in the thermal system of a ultra-supercritical unit and compared and analyzed were the thermal performance and energy-saving effectiveness of two kinds of superheating degree utilization version ,i. e. externally installed type steam cooler and recuperative type small-sized steam turbine. It has been found that both externally installed type steam cooler and recuperative type small-sized steam turbine versions can effectively lower the superheating degree of the steam extracted from the ultra-supercritical unit under various operating conditions and reduce the coal consumption of the unit. The recuperative type small-sized steam turbine version can lower the superheating degree of the steam extracted from several stages at a same time ,thus its energy-saving effectiveness is better than that of the superheating degree utilization version by using a one-stage externally-installed type steam cooler. Under the design operating condition ,the recuperative type small-sized steam turbine version can save coal by 1.34 g/kWh ,two times higher than that of the externally-installed type steam cooler version. When the load goes down ,the energy-saving result of the externally-installed type steam cooler version slightly becomes good ,however ,that of the recuperative type small-sized steam turbine version conspicuously becomes poor ,thus the results achieved by adopting both energy saving versions get close to each other. **Key words:** ultra-supercritical unit ,off-design condition ,superheating degree utilization ,thermal performance analysis

CFB 机组底渣余热回收方案的分析比较 = **Analysis and Comparison of the Bottom Slag Waste Heat Recovery Versions for a CFB (Circulating Fluidized Bed) Boiler Unit** [刊 , 汉] SU Yin-jiao ,SU Tie-xiong ,MA Li-