

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20190471

垂直水冷壁异形鳍片区域温度与热应力分布

徐青蓝¹, 周克毅¹, 肖杰², 杨浩蓝¹, 张凌翔¹⁽¹⁾ 东南大学能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;⁽²⁾ 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 超/超超临界锅炉垂直水冷壁中间集箱附近的水冷壁异形鳍片区域向火侧易出现横向裂纹, 可能导致水冷壁泄漏或爆管。以某 660 MW 超超临界锅炉为对象, 介绍了水冷壁异形鳍片区域温度和热应力的数值计算模型。针对横向裂纹问题, 基于计算数据分析了该区域的温度和热应力分布特征, 以及锅炉负荷变化和水冷壁尺寸的影响。结果表明, 异形鳍片旁的管壁向火侧顶点的轴向拉应力和等效应力大, 锅炉变负荷运行易产生交变热应力, 导致横向裂纹; 异形鳍片中心为整个模型温度最高处, 轴向应力和等效应力值也较大, 需要重点关注; 异形鳍片与管壁交接处等效应力大, 材料失效时容易产生裂纹, 可能向旁边的异形鳍片区域管壁向火侧延伸。

关键词: 垂直水冷壁; 横向裂纹; 数值模拟; 模型简化; 热应力; 计算流体力学

中图分类号: TK 223.3

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 0438-1157 (2019) 12-4582-08



Distribution of temperature and thermal stress in vertical water wall special-shape fin region

XU Qinglan¹, ZHOU Keyi¹, XIAO Jie², YANG Haolan¹, ZHANG Lingxiang¹

⁽¹⁾ Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; ⁽²⁾ Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu, China)

Abstract: Transverse cracks are easily produced in ultra-supercritical boiler vertical water wall special-shaped fin region near intermediate heater. It is the hidden trouble of water wall leakage and explosion. Take special-shape fin region from a 660 MW ultra-supercritical boiler as research object. Temperature fields and thermal stress fields were obtained by numerical model. Based on calculation data, temperature and thermal stress characteristics were analyzed. The influence of varying load operation and water wall geometry size was also considered. The results show that the axial tensile stress and equivalent stress of the tube wall beside the shaped fin to the apex of the fire side are large, and the alternating load of the boiler is prone to alternating thermal stress, resulting in transverse crack. The highest temperature of the whole model is located at water wall special-shape fin center. Axial stress and equivalent stress are also large in this region. It deserves special attention. Equivalent stress is large in connection point of special-shape fin and tube wall, which results in materials failure and cracks. Cracks may extend to fire-side tube of special-shape fin region.

Key words: vertical water wall; transverse cracks; numerical simulation; model reduction; thermal stress; CFD

收稿日期: 2019-05-06 修回日期: 2019-09-17

通信作者: 周克毅(1955—),男,博士,教授, boiler@seu.edu.cn

第一作者: 徐青蓝(1995—),女,硕士研究生, 220170437@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(51676035)

引用本文: 徐青蓝, 周克毅, 肖杰, 杨浩蓝, 张凌翔. 垂直水冷壁异形鳍片区域温度与热应力分布[J]. 化工学报, 2019, 70(12): 4582–4589

Citation: XU Qinglan, ZHOU Keyi, XIAO Jie, YANG Haolan, ZHANG Lingxiang. Distribution of temperature and thermal stress in vertical water wall special-shape fin region[J]. CIESC Journal, 2019, 70(12): 4582–4589

引言

超/超临界直流锅炉垂直上升水冷壁向火侧壁面常发现横向裂纹,中间集箱附近的水冷壁异形鳍片区域尤为严重^[1-4]。横向裂纹在形态上呈细丝状,与水冷壁管轴线接近垂直^[5],内含腐蚀性产物,可能会导致水冷壁泄漏或爆管事故^[3,6-8]。横向裂纹的产生与温度、热应力、负荷变动、焊接残余应力和烟气侧腐蚀等因素有关^[9-12]。本文从金属温度和热应力方面分析可能导致水冷壁异形鳍片区域产生横向裂纹的影响因素。

目前的研究,有关水冷壁温度和热应力的数值计算主要集中在异形鳍片区域以外的直管段,分析了炉膛运行情况和几何结构对直管段水冷壁温度及热应力的影响^[13-19],以及热偏差和不均匀流动对直管段水冷壁的温度分布的影响^[20-23],还有一些研究模拟了变负荷下的直管段水冷壁热应力情况^[24-26]。迄今为止,有关水冷壁异形鳍片区域金属温度和热应力的研究鲜见报道,值得进一步深入研究该区域温度和热应力对横向裂纹的影响。

水冷壁异形鳍片区域位于水冷壁中间集箱附近,此处水冷壁直管通过引入管和引出管与中间集箱和混合器相连,如图1所示,其中图1(b)、(c)为现场割样。异形鳍片的散热困难,受力复杂,引入管和引出管弯头制造过程的残余应力大。运行中,异形鳍片中心易开裂,并且裂纹可能逐渐向周围扩展。异形鳍片旁的水冷壁管比直管段水冷壁更易产生横向裂纹^[27-28]。

本文介绍了以某660 MW超超临界锅炉水冷壁异形鳍片区域为对象而建立的数值模型,以及计算得到的温度和热应力分布,并由此分析了可能导致水冷壁横向裂纹的影响因素,包括锅炉负荷变化、

水冷壁焊接偏差及引入管和引出管弯管曲率半径对温度和热应力分布的影响,为垂直管圈水冷壁的设计和超超临界锅炉的优化运行提供依据。

1 计算模型的建立

建模对象来自某660 MW超超临界直流锅炉,该锅炉采用Π型布置,炉膛为垂直上升膜式水冷壁。选取包含异形鳍片区域的四根水冷壁管建立温度场模型和热应力场模型,利用有限元分析软件ANSYS完成建模。

1.1 几何模型

图2是水冷壁异形鳍片区域的几何模型及管内工质流体,分别标为1#~4#管。1#、2#管内工质通过引出管流入中间集箱,混合后通过引入管流入3#、4#管,水冷壁背火侧顶部、中部和底部分别有刚性梁固定,三维坐标定义见图2。其中,水冷壁管外径和内径分别为28.6 mm和16.2 mm,鳍片厚度8 mm,横向节距44.5 mm,引入管和引出管弯管曲率半径 R_c 为28.6 mm,1#~4#管长度分别为1210、500、1210和500 mm,弯管长度为300 mm。水冷壁管壁和鳍片材料的物理性质相近,模型中均视为15CrMo。采用四面体网格划分几何体,对32万~726万之间的7种网格进行了网格无关性分析,最后确定采用402万网格进行计算。

1.2 温度场模型

温度场模型为稳态,通过ANSYS中的CFD(计算流体力学)软件Fluent求解温度场,选择了能量方程以及standard $k-\varepsilon$ 模型和加强壁面处理函数^[29]。模型在炉膛高度方向上有1.7419 m,整个炉膛高达70余米,虽然炉膛热负荷沿高度方向存在不均匀性,可认为本模型涉及管段的向火侧热通量为定值。其边界条件是:固体域向火侧壁面接受炉膛均

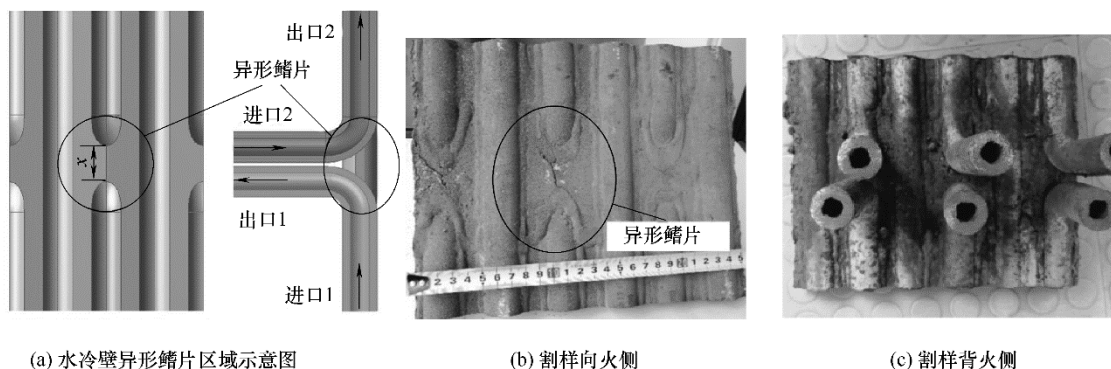


图1 水冷壁异形鳍片区域

Fig.1 Water wall special-shape fin region

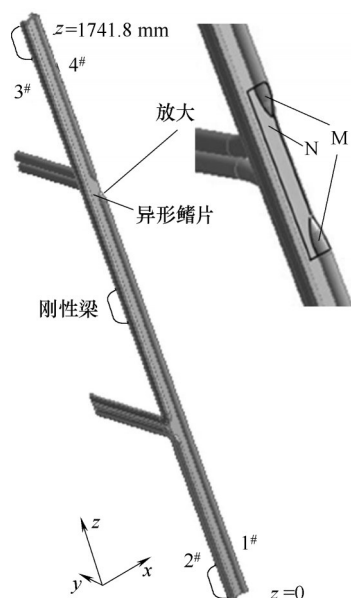


图2 水冷壁异形鳍片区域几何模型

Fig.2 Geometry model of water wall special-shape fin region

匀的辐射热流 q_l ,背火侧壁面绝热,流体域给定每根管子工质进口温度 t_{in} 、流速 v 等。锅炉BMCR(锅炉最大连续蒸发量)工况下的各管工质参数如表1所示^[30],固体域材料15CrMo的部分物理性质如表2所示^[31]。

表1 BMCR工况下工质参数

Table 1 Parameters of steam for BMCR

水冷壁管编号	$t_{in}/^{\circ}\text{C}$	P/MPa	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1#/2#	403.04	28.02	5.4088/5.3610
3#/4#	412.35	27.91	7.2547/6.8998

表2 15CrMo部分物理参数

Table 2 Part of physical parameters of 15CrMo

$t/^{\circ}\text{C}$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\alpha(\text{to } 0^{\circ}\text{C})\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	γ	$E\times 10^{-3}/\text{MPa}$
20	7850	460	—	44.4	0.284	2.17
300	7850	540	13.2	41.9	0.301	1.97
600	7850	800	14.3	34.8	0.308	1.69

注: t —温度, ρ —密度, c_p —比定压热容, α —线膨胀系数, λ —热导率, γ —泊松比, E —弹性模量。

水冷壁直管段向火侧上每点的实际热负荷 $q(x)$ 为

$$q(x) = q_l \Psi(x) \quad (1)$$

其中, $\Psi(x)$ 为角系数。BMCR工况下,由锅炉炉膛热力计算可以得到平均热负荷 q_l 为 $143.38 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[30]。直管段管壁和鳍片的角系数是采用交叉线法^[32]得到的,如图3所示。图2中标示的引入管、

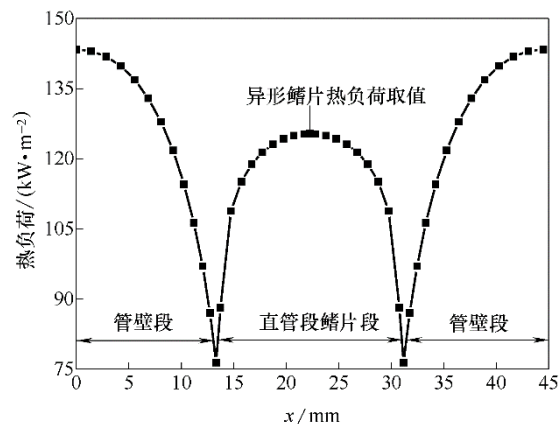


图3 热负荷沿x方向的分布

Fig.3 Thermal load at x direction

引出管弯头向火侧壁面M的热负荷与同一 y 坐标的直管段水冷壁管壁相同,异形鳍片向火侧壁面N整体的热负荷统一取直管段鳍片的最高热负荷,为 $125.35 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$,具有安全余量,计算结果对分析现场水冷壁的安全问题具有参考价值。通过Fluent的UDF(user define function)方法将热负荷加载至整个向火侧壁面。

1.3 热应力场模型

把 Fluent 求解的固体域温度场加载到在 ANSYS 中静力学分析模块 Mechanical,进行单向流固耦合,求解固体域的热应力场,零膨胀量温度设为 22°C 。

热应力场模型约束条件如图4所示,模型顶部截面沿管道轴向位移 $U_z=0$,底部截面承受下部45 m长的水冷壁金属的重力 F ;1#、4#管对称面沿平行管屏方向位移 $U_x=0$;管内壁承受工质压力 P ;模拟刚性梁对管子的固定作用,模型背火侧顶点顶部、中部和底部各10 cm长度沿垂直管屏方向位移 $U_y=0$ 。

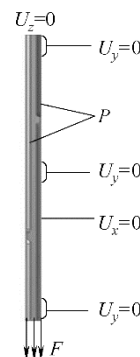


图4 约束条件

Fig.4 Constraint condition

2 BMCR 工况温度分布及热应力分布

利用上述模型可以计算水冷壁异形鳍片区域不同负荷下的温度及热应力分布。这里根据计算得到的BMCR工况下水冷壁温度和热应力分布,分析可能导致水冷壁横向裂纹的影响因素。

2.1 温度分布

图5(a)是整个模型的温度场,取截面1代表异形鳍片区域的温度场,取截面2代表直管段的温度场,分别见图5(b)、(c)。由图5可知,异形鳍片区域温度明显高于直管段,整个模型的最高温度位于1[#]、4[#]管之间异形鳍片中心A,为504.5℃,比直管段鳍片中心a温度高43.5℃,异形鳍片背火侧绝热,只能将其热量传导至周围的水冷壁管内工质散热。根据傅里叶定律可知,异形鳍片的面积大于直管段鳍片,故异形鳍片中心散热困难,温度高。异形鳍片区域管壁向火侧顶点B为453.1℃,和正常区域管壁向火侧顶点b(451.5℃)基本相同。将温度场数值模拟结果与水动力金属壁温计算结果对比^[30],截面2向火侧偏差为0.19%,故认为模型具有准确性。

尽管在BMCR工况下,模型中所有金属都处于15CrMo许用温度550℃^[32]之下,但考虑到水冷壁热

偏差影响,以及火焰偏斜等不良运行情况,在实际运行中局部热负荷有可能增大,异形鳍片温度升高,甚至超过材料许用温度。当材料温度升高,强度将下降,在相对较小的应力下也有可能产生开裂,成为附近水冷壁横向裂纹的起源之一。

2.2 热应力分布

通常,横向裂纹出现在水冷壁向火侧壁面,与水冷壁管轴线接近垂直,其产生与轴向拉应力有很大联系。Mises等效应力遵循材料力学第四强度理论,综合考虑第一、第二、第三主应力,用于对管材破坏的评估。等效应力 $\bar{\sigma}$ 计算公式为^[33]

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2)$$

其中, σ_1 、 σ_2 与 σ_3 分别对应第一、二、三主应力。表3是15CrMo的高温屈服强度^[33],依据轴向应力、等效应力及材料高温屈服强度^[34],可以分析水冷壁异形鳍片区域横向裂纹的影响因素。

分别取通过异形鳍片中心和直管段水冷壁的水平截面,截面位置和图5(b)、(c)保持一致,为截面1和截面2。水冷壁向火侧边沿受到烟气侧腐蚀作用,管壁减薄,材料强度下降,更容易产生横向裂纹,水冷壁表面开裂后,腐蚀气体进一步与基体金

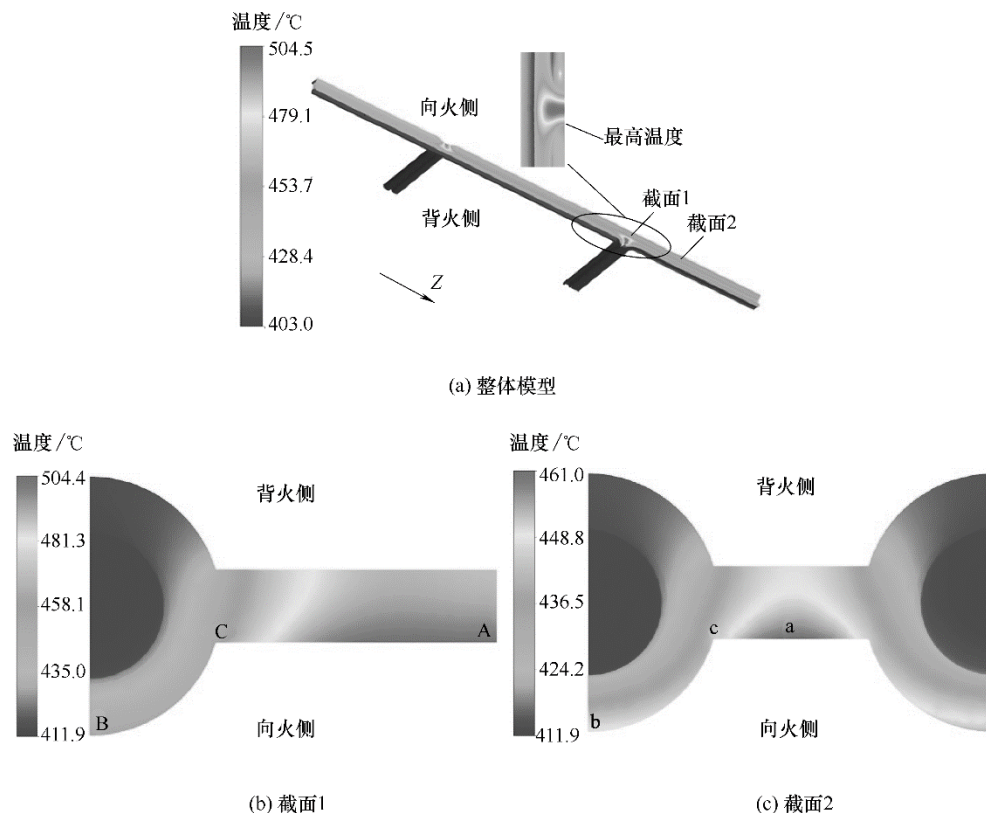


图5 BMCR 工况温度分布

Fig.5 Temperature distribution of BMCR

表3 15CrMo的高温屈服强度

Table 3 High temperature yield strength of 15CrMo

$t / ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0.2} / \text{MPa}$
200	269
250	256
300	242
350	228
400	216
450	205
500	198

属接触会加快腐蚀速率。同时,向火侧边沿的热应力高于向火侧内部金属,故有必要通过曲线图对比分析这两个截面向火侧边沿在BMCR工况下的轴向应力与等效应力沿 x (炉膛宽度)方向的分布,如图6、图7所示。图8是截面1的轴向应力与等效应力与高温屈服强度差值的云图,可结合图5中的温度分布分析。图6~图8中A、a、B、b、C和c各点的位置在图5(b)、(c)中均有标注。从图6可看出,异形鳍片区域向火侧边沿的轴向应力明显高于直管段水冷壁向火侧边沿。从图7中也可以看出,在管壁段,前者的等效应力也明显高于后者。

由图6、图8可得,异形鳍片旁的管壁向火侧顶点B的轴向拉应力为397.6 MPa,直管段的管壁向火侧顶点b的轴向拉应力为66.7 MPa。通过计算BMCR工况下温度场所对应的温度梯度发现,这两点的温度梯度大于向火侧边沿的其余部分。B、b点因温度梯度大而膨胀不均匀,轴向拉应力大。前者轴向拉应力比后者大得多,更易产生横向裂纹。现场中,异形鳍片旁的管壁向火侧B确实是受横向裂纹问题侵扰最严重的位置^[27-28]。

从图7、图8可知,B、b点的等效应力分别为

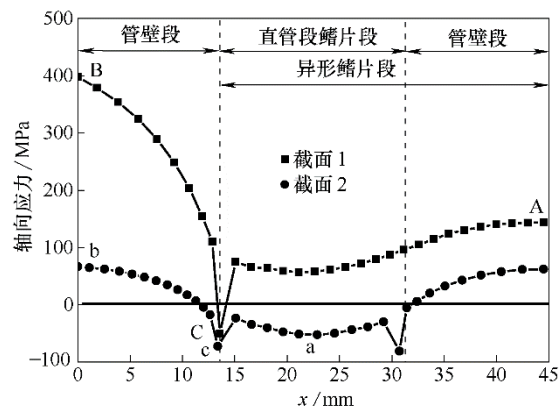


图6 截面1、2向火侧边沿的轴向应力分布

Fig.6 Axial stress distribution of section 1 and section 2 fire-side edge

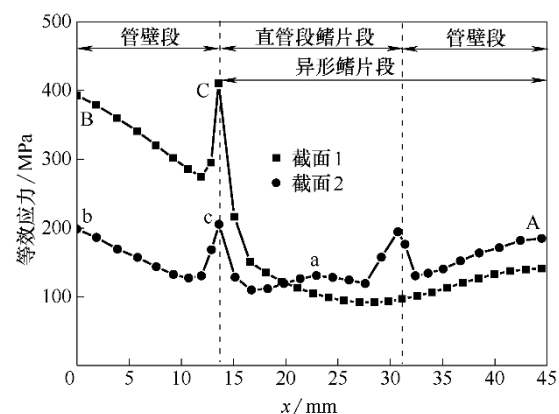
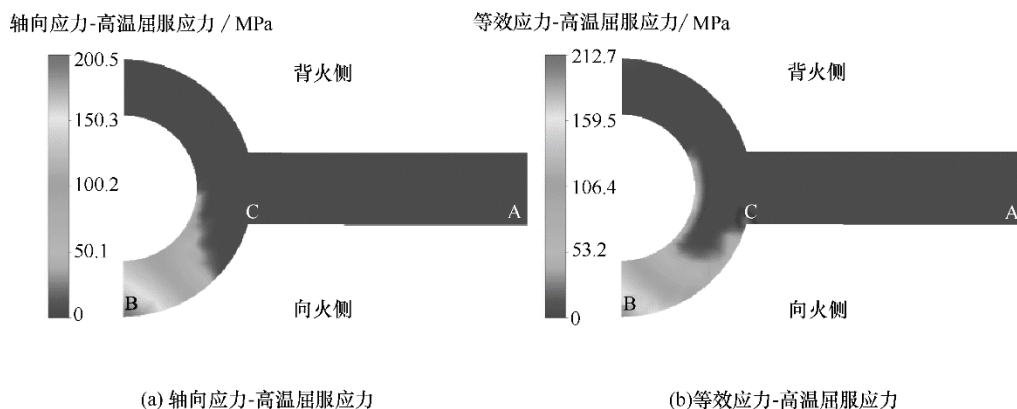


图7 截面1、2向火侧边沿的等效应力分布

Fig.7 Equivalent stress distribution of section 1 and section 2 fire-side edge

393.0和198.3 MPa。根据这两点的金属温度,由表3得到所对应的高温屈服强度为206 MPa。异形鳍片旁的管壁向火侧顶点B的等效应力值接近此值的2倍,容易导致材料失效,在轴向应力作用下,也容易导致横向裂纹。此处轴向拉应力和等效应力都大,



(a) 轴向应力-高温屈服应力

(b) 等效应力-高温屈服应力

图8 截面1热应力分布

Fig.8 Thermal stress distribution of section 1

故横向裂纹问题严重。尽管直管段管壁向火侧顶点b的等效应力值明显小于B点,但因其等效应力值接近高温屈服强度值,故仍有可能产生横向裂纹。

结合图6~图8分析,异形鳍片中心A轴向拉应力为143.9 MPa,等效应力为135 MPa,作为整个模型温度最高处,对应的高温屈服强度为193 MPa。A点的应力余量接近50 MPa,故不容易产生横向裂纹。但在负荷变化和热偏差较大的情况下,异形鳍片中心需要运行人员重点关注。直管段鳍片a轴向应力值和等效应力值都较小,不易产生横向裂纹。

异形鳍片与管壁交接处C和直管段鳍片与管壁交接处c几何形状突变,温度梯度较大,容易存在应力集中现象。C点的等效应力达到了410.7 MPa,约为该金属温度下的材料屈服强度的2倍,故此处容易产生材料失效,在负荷变化下容易产生裂纹。裂纹有可能向旁边的轴向应力和等效应力大的异形鳍片区域管壁向火侧延伸。c点的等效应力为205.8 MPa,也有可能产生裂纹。

3 其他因素对温度分布及热应力分布的影响

锅炉变负荷运行,以及部分带有引入管和引出管的水冷壁管出现焊接偏差或弯管曲率半径变大,会影响温度和热应力分布,有必要分析这些因素对水冷壁温度和热应力分布的影响。

3.1 锅炉变负荷运行的影响

由所建模型,对锅炉75%THA(THA:额定出力工况)和50%THA工况下的温度和热应力分布进行分析。结合电厂提供的该台锅炉热力参数及水力计算结果^[30],可得到这两个工况下热负荷参数及蒸气入口参数。比较三种工况的计算结果,发现各负荷下温度和热应力分布的整体规律不变,但数值上有显著差异。图9为部分计算结果,A、B、C位置见图5(b)。

由图9可知,锅炉负荷降低,工质温度也降低,故异形鳍片中心温度也降低。异形鳍片旁的管壁向火侧顶点B的轴向拉应力和等效应力,和异形鳍片与管壁交接处C的等效应力都随锅炉负荷降低而减小。横向裂纹呈疲劳特征,应力集中的部位在交变应力下萌生疲劳裂纹。如在深度调峰下,锅炉负荷变化频率高且变动幅度大,水冷壁金属材料热应力在大幅超过高温屈服强度时,幅度小频率高的应

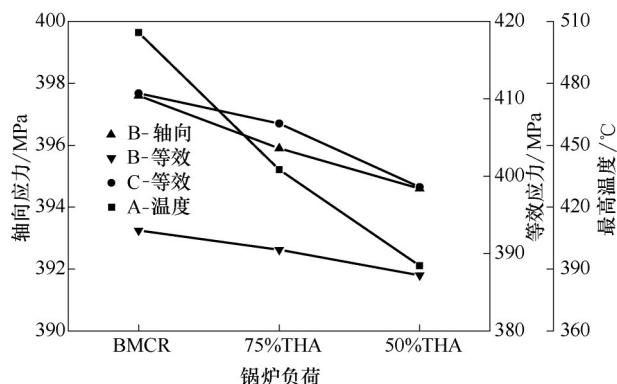


图9 变负荷下部分点的计算结果

Fig.9 Results of some points in different load

力波动会加速横向裂纹的形成。

3.2 水冷壁尺寸的影响

观察图10所示的水冷壁异形鳍片区域的管屏割样,发现制造时有部分带有引入管和引出管的水冷壁管在沿背火侧方向上出现3~4.5 mm的焊接偏差,导致异形鳍片区域面积增大,散热更加困难,更容易超温。为分析这种焊接偏差的影响,将模型中的4#管沿背火侧方向偏移5 mm,此时引入管和引出管顶点之间的距离 x [图1(a)]由无焊接偏差时的33.3 mm增加到40.6 mm。

计算结果表明,当存在焊接偏差时,模型最高温度、最大轴向应力和最大等效应力的位置仍位于A、B、C点,锅炉负荷变化导致其温度和热应力变化的趋势和幅度基本不变。图11给出了管子偏移5 mm和零偏移两种情况下的BMCR、75%THA和50%THA工况下的模型最高温度、最大轴向应力以及最大等效应力计算值。

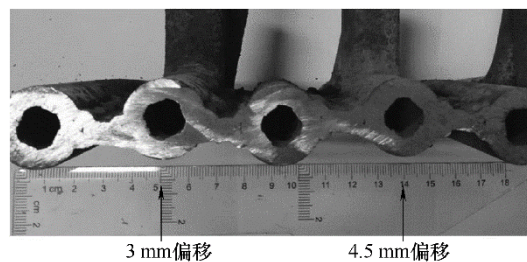


图10 焊接偏差

Fig.10 Welding migration

由图11可知,在BMCR工况下,焊接偏差导致管子朝背火侧偏移,异形鳍片面积增大,散热更困难,管子偏移5 mm比零偏移时的最高温度升高13.2℃。管子焊接偏移使得水冷壁异形鳍片区域的管屏结构不规律,受力情况更复杂,更容易造成应力集中,管子偏移5 mm比零偏移时的最大轴向应力

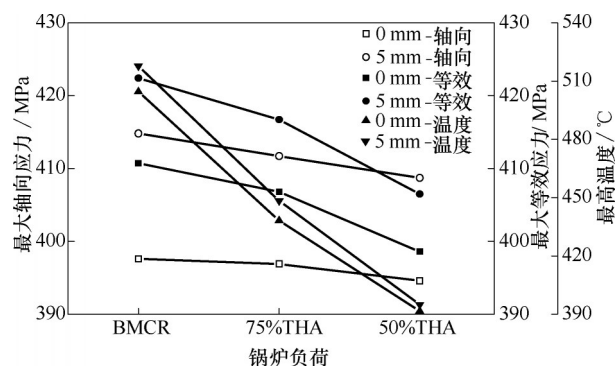


图 11 管子偏移 5 mm 时部分点的计算结果

Fig.11 Results of some points for 5 mm tube migration

和最大等效应力增加 17.2 MPa 和 11.2 MPa。

为分析引入管和引出管弯管曲率半径 R_c 的影响,将 R_c 从设计尺寸的 28.6 mm 增加至 40 mm,此时引入管和引出管顶点之间的距离 x 由原来的 33.3 mm 增加到 48.2 mm,异形鳍片面积增大,散热更加困难。最高温度达到 541.4℃,接近材料的许用温度 550℃。在运行中如遇火焰偏斜或流量与热负荷不匹配等情况,非常容易超温。从温度方面考虑,水冷壁引入管和引出管的弯管曲率半径对水冷壁异形鳍片区域的温度影响很大,曲率半径越大,异形鳍片的温度越高,故弯管曲率半径不宜过大。

4 结 论

本文介绍了超超临界锅炉中间集箱附近的垂直水冷壁异形鳍片区域的温度和热应力数值模型,分析了其温度、轴向应力及等效应力分布,得到以下结论。

(1) 异形鳍片旁的管壁向火侧顶点 B 的轴向拉应力和等效应力都大,锅炉变负荷运行易产生交变热应力,导致横向裂纹。

(2) 异形鳍片中心 A 为整个模型温度最高处,轴向应力和等效应力值较大,需要重点关注。

(3) 异形鳍片与管壁交接处 C 等效应力大,材料失效时产生裂纹,裂纹可能向旁边轴向应力大的异形鳍片区域管壁向火侧延伸。

(4) 水冷壁管朝背火侧的焊接偏差使异形鳍片区域的最高温度、最大轴向应力和最大等效应力增大;水冷壁引入管和引出管的弯管曲率半径不宜过大。

参考文献

[1] Dhua S K. Metallurgical investigation of failed boiler water-wall

tubes received from a thermal power station[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 7(17): 1572-1579.

[2] Liu S W, Wang W Z, Liu C J. Failure analysis of the boiler water-wall tube[J]. Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2017, 9: 35-39.

[3] Ahmad J, Purbolaksono J, Beng L C, et al. Failure investigation on rear water wall tube of boiler[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(7): 2325-2332.

[4] 石荣雪, 张适宜, 张胜寒. 基于大数据分析的电厂锅炉水冷壁失效研究[J]. 化工进展, 2016, 35(9): 2640-2646.

Shi R X, Zhang S Y, Zhang S H. Failure investigation on boiler water wall tubes in power plant by large data analysis[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(9): 2640-2646.

[5] 马新立, 徐颂梅. 低 NO_x 燃烧器改造后水冷壁横向裂纹原因及治理[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2): 72-74.

Ma X L, Xu S M. Reasons and treatment of transverse crack in water wall after low NO_x burner transformation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(2): 72-74.

[6] 殷尊, 蔡晖, 侯召堂, 等. 国产 1000 MW 超超临界机组水冷壁管典型横向裂纹分析[J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(3): 442-447.

Yin Z, Cai H, Hou Z T, et al. Study on typical transverse crack of water wall tube of 1000 MW domestic ultra-supercritical units[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2015, 33(3): 442-447.

[7] 严方. 火电机组水冷壁管横向裂纹失效机理分析与热应力数值模拟[J]. 热加工工艺, 2013, 42(10): 83-86.

Yan F. Crack failure mechanism analysis of thermal power units of water wall tube transverse and numerical simulation of thermal stress[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(10): 83-86.

[8] Prabu S S, Choudhary A, Mittal N, et al. Failure evaluation of SA 210C raffle water wall tubes in 70 MW CFBC boiler[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 95: 239-247.

[9] Wang S Y, Yang D, Liu D, et al. Experimental and theoretical analysis on the safety and efficiency of an ultra-supercritical pulverized coal-fired boiler with low mass flux vertical water wall[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146: 440-449.

[10] 何洪浩, 李文军, 曾俊, 等. 超超临界直流锅炉垂直管屏水冷壁壁温分布特性[J]. 动力工程学报, 2017, 37(4): 257-260+292.

He H H, Li W J, Zeng J, et al. Temperature distribution of vertical tube water wall in an ultra-supercritical once-through boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(4): 257-260+292.

[11] 徐力刚, 黄亚继, 王健, 等. 还原性气氛下水冷壁材料 15CrMoG 的高温腐蚀特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(8): 1535-1541.

Xu L G, Huang Y J, Wang J, et al. High-temperature corrosion properties of water wall material 15CrMoG under reducing atmosphere[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(8): 1535-1541.

[12] 邹磊, 岳峻峰, 张恩先, 等. 超超临界锅炉水冷壁管材高温腐蚀特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6353-6359+6497.

Zou L, Yue J F, Zhang E X, et al. Study on characteristics of high temperature corrosion for water wall tube material in ultra supercritical boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6353-6359+6497.

- [13] Badur J, Ziolkowski P, Sławiński D, et al. An approach for estimation of water wall degradation within pulverized-coal boilers[J]. *Energy*, 2015, **92**: 142–152.
- [14] Fu J, Wei L, Li N, et al. Experimental study on temperature, heat flux, strain and stress distribution of boiler water walls[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, **113**: 419–425.
- [15] 王学, 朱迪, 胡磊, 等. 1000 MW 塔式炉水冷壁 T23 钢接头短期失效分析[J]. *中国电机工程学报*, 2015, **35**(S1): 154–161.
Wang X, Zhu D, Hu L, et al. Analysis on short-term failure of T23 steel welded joints in water wall of USC tower boilers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, **35**(S1): 154–161.
- [16] 刘旭东, 盛伟, 关多娇, 等. 600 MW 超临界锅炉膜式水冷壁的热应力分析[J]. *锅炉技术*, 2010, **41**(6): 11–14+23.
Liu X D, Sheng W, Guan D J, et al. An analysis of the thermal stress of membrane water wall of 600 MW supercritical boiler[J]. *Boiler Technology*, 2010, **41**(6): 11–14+23.
- [17] 刘旭东, 盛伟, 张劲松. 600 MW 超临界锅炉炉膛膜式水冷壁的热行为研究[J]. *动力工程*, 2009, **29**(12): 1083–1087.
Liu X D, Sheng W, Zhang J S. Thermal behavior of membrane waterwall of 600 MW supercritical pressure boiler furnace[J]. *Journal of Power Engineering*, 2009, **29**(12): 1083–1087.
- [18] 李斌, 汪华剑, 梁学东, 等. 超超临界锅炉水冷壁管传热恶化对横向裂纹影响的有限元分析[J]. *中国电力*, 2015, **48**(12): 64–69.
Li B, Wang H J, Liang X D, et al. Finite element analysis for the influence of heat transfer deterioration to transverse cracks in ultra-supercritical boiler water wall[J]. *Electric Power*, 2015, **48**(12): 64–69.
- [19] 范旭宸, 陈晔, 郑雄, 等. 600 MW 超临界循环流化床锅炉水冷壁热应力分析[J]. *动力工程学报*, 2018, **38**(4): 253–257.
Fan X C, Chen Y, Zheng X, et al. Thermal stress analysis of water wall in a 600 MW supercritical CFB boiler[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2018, **38**(4): 253–257.
- [20] 李舟航, 唐国力, 吴玉新, 等. 管内周向不均匀流动对超临界锅炉膜式水冷壁温度分布的影响及简化计算[J]. *中国电机工程学报*, 2015, **35**(5): 1153–1160.
Li Z H, Tang G L, Wu Y X, et al. Effect of circumferential flow non-uniformity on the temperature distribution of membrane water wall in supercritical boilers and simplified calculation methods[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, **35**(5): 1153–1160.
- [21] 葛学利, 张忠孝, 范浩杰, 等. 热偏差和流量偏差对 1000 MW 超超临界锅炉水冷壁壁温影响的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, **38**(8): 2348–2357+2544.
Ge X L, Zhang Z X, Fan H J, et al. Study on the effect of flame offset and flow deviation on wall water tube temperature of 1000 MW ultra-supercritical boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, **38**(8): 2348–2357.
- [22] 张志正, 孙保民, 徐鸿, 等. 沁北发电厂超临界压力电站锅炉水冷壁截面温度场分析[J]. *中国电机工程学报*, 2006, **26**(7): 25–28.
Zhang Z Z, Sun B M, Xu H, et al. Analysis of the water wall temperature field of 600 MW supercritical boiler of Qinbei power plant[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, **26**(7): 25–28.
- [23] 王为术, 徐维晖, 顾红芳, 等. 超超临界锅炉垂直水冷壁温度场的数值计算[J]. *动力工程*, 2009, **29**(8): 707–712+721.
Wang W S, Xu W H, Gu H F, et al. Numerical calculation on temperature fields of vertical waterwall in ultra-supercritical boilers[J]. *Journal of Power Engineering*, 2009, **29**(8): 707–712+721.
- [24] 周俊虎, 杨卫娟, 刘建忠, 等. 锅炉变负荷引起的水冷壁渣层热应力[J]. *化工学报*, 2003, **54**(12): 1678–1682.
Zhou J H, Yang W J, Liu J Z, et al. Thermal stress of slag on wall tube created by boiler load shift[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering(China)*, 2003, **54**(12): 1678–1682.
- [25] 林伟宁, 梁钦锋, 刘海峰, 等. 水冷壁气化炉变工况温度及热应力分析[J]. *化工学报*, 2009, **60**(10): 2568–2575.
Lin W N, Liang Q F, Liu H F, et al. Temperature and thermal stress analysis in membrane wall gasifier under varied work conditions[J]. *CIESC Journal*, 2009, **60**(10): 2568–2575.
- [26] 林伟宁, 梁钦锋, 徐赢, 等. 水冷壁气化炉紧急停车渣层热应力分析[J]. *化工学报*, 2008, **59**(3): 713–720.
Lin W N, Liang Q F, Xu Y, et al. Analysis of thermal stress of slag layer for emergency shutdown in water wall gasifier[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering(China)*, 2008, **59**(3): 713–720.
- [27] 刘瑞堂, 侯彦芬, 王忠华, 等. 电厂用锅炉水冷壁辐射过热器管弯头开裂原因分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2005, **26**(1): 105–109.
Liu R T, Hou Y F, Wang Z H, et al. Analysis of failure in elbow of radiation superheater of 500 MW boiler in a power plant[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2005, **26**(1): 105–109.
- [28] 杨阳, 许彤. 640 MW 超临界锅炉中间集箱水冷壁鳍片结构改进与探讨[C]// 2017 年江西省电机工程学会年会. 南昌: 江西省电机工程学会, 2018: 149–151.
Yang Y, Xu T. Improvement and investigation of the structure of water wall fin near intermediate header in a 640 MW supercritical boiler[C]// 2017 Jiangxi Society for Electrical Engineering Annual Conference. Nanchang: Jiangxi Society for Electrical Engineering, 2018: 149–151.
- [29] Hirsch C. Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics[M]. Dutch: Elsevier, 2007.
- [30] 沈倩. 超超临界锅炉垂直管圈水冷壁水动力特性对金属壁温的影响[D]. 南京: 东南大学, 2018.
Shen Q. Effect on metal wall temperature by hydrodynamic characteristics of vertical water-wall in ultra-supercritical pressure boiler[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [31] 黄庆康, 姜求志, 王金瑞, 等. 火力发电厂金属材料手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
Huang Q K, Jiang Q Z, Wang J R, et al. Handbook of Metal Materials for Thermal Power Plants[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [32] 周一工. 膜式水冷壁表面热流密度分布的精确解[J]. *锅炉技术*, 1991, (1): 1–6.
Zhou Y G. Exact solution of flux on membrane water-wall[J]. *Boiler Technology*, 1991, (1): 1–6.
- [33] Sadd M H. Elasticity: Theory, Applications, and Numerics[M]. New York: Academic Press, 2009.
- [34] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 高压锅炉用无缝钢管: GB/T 5310—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Seamless steel tubes and pipes for high pressure boiler: GB/T 5310—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.