

电站锅炉集箱管座角焊缝缺陷安全性分析方法

刘富君, 唐 萍, 凌张伟, 夏珺芳

(浙江省特种设备检验研究院, 杭州 310020)

摘 要: 电站锅炉集箱管座角焊缝位置经常发现裂纹缺陷, 部分接管甚至出现泄漏. 为避免类似问题的出现, 在该部位角焊缝进行现场勘测及关键部位应力测试的基础上, 对管座角焊缝的焊接结构进行了数值计算. 探讨了其裂纹产生的原因, 分析了内部未焊透缺陷对角焊缝结构安全性的影响. 结果表明, 所提出的角焊缝缺陷安全性分析方法是可行的及正确的, 为电厂焊接结构的安全检修提供了科学的依据.

关键词: 电站锅炉; 角焊缝; 应力测试; 安全性分析; 数值计算

中图分类号: TG44 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2013)10-0083-04



刘富君

0 序 言

电站锅炉内部炉管长期经受高温高压和不稳定火焰冲击, 极易产生破裂泄漏, 特别是集箱与接管连接的焊缝处, 由于工作环境恶劣、经常产生不明原因的泄漏, 严重影响安全运行. 目前单机大容量锅炉中高温再热器集箱与管子的联接普遍采用焊接结构, 焊接区渗漏有较高的故障发生率, 频繁的停机抢修对于发电厂造成了很大的电力损失和人力、物力浪费. 除此之外, 多次启动对于锅炉的疲劳寿命也造成非常惊人的损失. 目前大量的专家学者对于焊接结构及焊接材料等方面开展了研究^[1-4], 并在此基础上, 针对电站锅炉焊缝缺陷的安全性评估进行了分析探讨^[5-7], 针对某电站锅炉多次发现炉顶低再集箱管座角焊缝位置发生裂纹缺陷, 导致泄漏的事故, 对管座角焊缝结构进行了安全性分析方法的研究.

通过现场勘测发现, 裂纹外表面位置大部分在管座角焊缝上半圈焊趾线处, 部分接管甚至出现泄漏, 通过对部分管座根部进行打磨, 发现部分焊缝内部有未焊透痕迹. 为判定低再集箱管座焊缝多处发生裂纹甚至泄漏的原因, 同时为避免其它管接头角焊缝部位出现类似问题, 需对缺陷发生的原因进行研究, 分析内部未焊透缺陷对角焊缝结构安全性的影响规律, 探讨出一种对角焊缝缺陷安全性分析的方法, 对以后电厂的安全检修提供科学的依据.

1 试验测试

针对电站锅炉的裂纹缺陷多发生在炉顶低再集箱的管座角焊缝位置, 在该部位选取了具有代表性的管线, 进行了管线安装应力的测试.

1.1 应力测试方法

应力测试使用日本 TML 公司的 DRA-30A 数字应变仪和中航电测 BE120-3CB 及 BE120-2BA 型应变片, 应力测试部位如图 1 所示. 测试方法为, 在锅炉停机情况下, 先贴好应变片, 然后割断管子, 使管子变形松弛, 测量应变片应变值. 该方法可以检测冷态下管子受到安装约束产生的应力, 并可包含管排自重对管座角焊缝产生的拉应力.

炉管及集箱上的贴片位置如图 1, 并经过两组

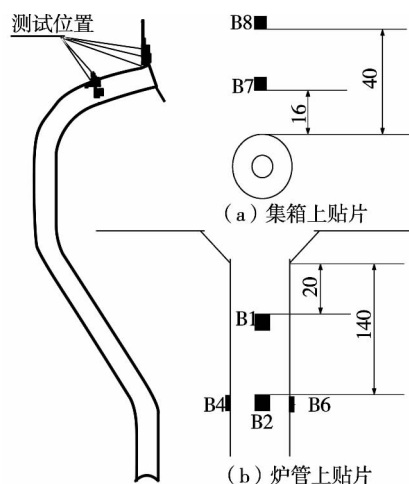


图 1 贴片方案 (mm)

Fig. 1 Schematic of stress test

收稿日期: 2012-07-16

基金项目: 浙江省质量技术监督系统科研项目(20110106); 质检公益行业科研专项(201210019)

测量比较后发现 B7, B8 位置(集箱上)和 B4, B6 位置各项应变相对于 B1, B2 位置均非常小. 因此后续

检测均只测试 B1, B2 位置应变, 其检测结果换算为应力值见表 1.

表 1 简化贴片检测结果
Table 1 Test results of simple arranged stress test

炉管编号	B1 轴向应力 σ_{a1} /MPa	B1 环向应力 $\sigma_{\theta 1}$ /MPa	B2 轴向应力 σ_{a2} /MPa	B2 环向应力 $\sigma_{\theta 2}$ /MPa	切割后偏移量 δ /mm
1	-88	28.0	-50	16.0	13
2	-52	14.0	-31	6.4	7
3	-58	3.5	-34	7.2	5
4	-60	16.0	-36	9.0	8
5	-46	9.4	-28	7.4	5
6	-76	21.0	-51	13.0	10
7	-41	10.0	-34	8.2	12
8	-21	4.2	-17	3.0	7
9	-63	19.0	-47	14.0	5
10	-92	32.0	-67	21.0	13

1.2 测试结果

通过现场应力测试的结果可知, 炉管主要应变集中在上表面, 即 B1, B2 所检测的部位, 其它部位较小, 可以忽略. 上表面应变在 200 ~ 400 微应变之间, 换算为应力约为 40 ~ 80 MPa 之间, 存在一定的因安装和本身重力载荷引起的应力. 另外检测过程中管子被切断后的错位偏移距离在 5 ~ 13 mm.

2 数值模型

2.1 模型结构

由现场勘测发现, 管座角焊缝部位部分焊缝焊高不均匀, 且焊缝表面不平整, 如图 2, 另外焊缝接管侧非圆弧过渡. 测量一外形较差的焊脚高度为集箱侧焊脚 12 mm, 管座侧焊脚 7 mm.



图 2 焊缝外观

Fig. 2 Filled weld appearance

数值计算中, 其焊缝的结构型式为现场测试的结构. 接管与集箱的连接结构、材料和设计参数由该低温再热器出口段的设计图纸确定. 考虑到只针对接管与集箱连接焊缝处的应力水平进行研究, 且

裂纹缺陷多发生在炉前管角焊缝位置, 故选用炉前管的结构进行有限元模型的建立, 其管材为 12Cr1MoVG 钢, 弹性模量、屈服应力和抗拉强度等物理量由拉伸试验测试得到.

2.2 数值方法

有限元模拟采用大型有限元软件 ANSYS 进行计算, 根据 ASME 设计参数的要求, 进行了弹性应力计算, 采用精度更高的三维实体模型及高阶单元 Solid95. 为在主要关注部位得到性能较好的规则六面体网格, 模型中采用映射网格划分和扫略网格划分相结合的方式对实体模型进行网格划分.

网格划分过程中, 对于接管和集箱开孔根部角焊缝附近的局部结构不连续区域, 进行了局部加密, 以适应这些部位的不连续应力和应力集中. 模型网格的划分密度通过了子模型方法的验证, 即对管座根部和集箱开孔根部焊缝附近的局部结构建立子模型, 进行加密计算, 验证网格无关性, 从而确保应力结果的准确性.

2.3 边界条件

集箱采用固支边界. 计算模型中集箱所取的结构, 以对焊缝处计算的应力水平无影响为原则, 集箱侧壁厚、刚度, 故在模型计算中将其设定为固支, 接管模型长度的选取, 以对于焊缝处计算的应力水平无影响为原则, 并且考虑到了其主要的弯曲结构. 安装载荷主要在接管的端部以拉弯载荷体现.

以现场应力测试割管时管线的偏移量作为弯管端部的位移边界条件, 在模型的计算过程中选取现场应力测试时的最大位移量以及平均位移量进行了模型的计算与讨论, 即以表 1 的 1 号与 2 号作为计算的模型, 最大的位移量代表在安装应力最大的情况下, 角焊缝的应力分布情况, 平均的位移量代表平

均水平,反应大多数角焊缝的应力分布情况。

3 结果及分析讨论

按照 ASME VIII-2 BPVC 2010 的规定,取焊缝处 Von Mises 应力为等效应力进行判定。图 3 为其 Von Mises 等效应力云图,从图 3 中可知,管座上部的焊缝处存在明显的应力集中区,对该处的局部应力进行线性化处理,进行局部应力强度校核。

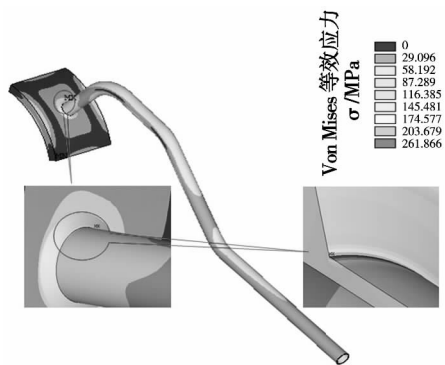


图 3 Von Mises 等效应力云图

Fig. 3 Von-mises equivalent stress distribution

3.1 应力水平的验证

为了验证模型的准确性,在不考虑内压及其它运行载荷的情况下进行数值计算,以模拟现场应力测试时的工况,选取数值计算在应力测试部位相应的应力值,与测试部位的应力值相比较,其结果如表 2 所示。计算的结果与实际结果基本相一致,误差在 6.8% 以内,从而保证了数值计算结果的可靠性。

表 2 数值计算结果与现场应力测试值的比较

Table 2 Equivalent stress comparison between simulation result and experiment

加载方式	位置	数值计算等效应力 σ_{ec}/MPa	现场测试等效应力 σ_{et}/MPa	误差 $E(\%)$
平均加载	B1	85.4	79.6	6.8
	B2	47.0	44.2	6.0
极限加载	B1	51.0	47.8	6.3
	B2	30.6	29.1	4.9

3.2 强度校核

根据 ASME BPVC 2010 取焊缝处 Von Mises 应力为等效应力,进行一次加二次应力强度的判定,即

$$P_m + P_b + Q \leq 3[S] \quad (1)$$

式中: P_m 为一次薄膜应力; P_b 为一次弯曲应力; Q 为二次应力; S 为许用应力。

以最大安装应力作为加载条件为例,进行强度

校核,根据设计标准,对其管座焊缝处的应力集中区进行应力线性化处理后的线性化应力为 250 MPa。焊缝处的焊接残余应力,依据国家标准 GB/T19624—2004《在用含缺陷压力容器安全评定》,取其工作温度下材料屈服应力的 0.3 倍(由标准中查得材料的屈服应力为 142 MPa),则焊接残余应力为 $0.3 \times 142 \text{ MPa} = 42.6 \text{ MPa}$ 。此处的总体应力为 $42.6 \text{ MPa} + 250 \text{ MPa} = 292.6 \text{ MPa}$ 。此结构处的钢管在设计温度下的许用应力为 101.6 MPa,根据标准的安全性要求对于局部应力取许用应力的 3 倍来进行校核,为 304.8 MPa,而此时焊缝处的应力值达到 292.6 MPa,合格,但已接近校核所容许的极限值。

由此推知,现场焊缝结构在平均加载情况下,均可以满足强度校核的要求,但在最大安装应力下,强度已达到所容许的极限值,因此在安装应力较大的情况下,此焊缝结构处的应力集中较为明显。

3.3 缺陷评定

该管接头处的角焊缝在设计过程中按全焊透形式进行设计,而其焊接方式采用管内先氩弧焊,然后管外电弧焊的方式,而此焊接方式本身无法保证全焊透的结构,对部分管座沿管子侧磨至壁厚 3 mm 时,发现有未焊透,故判断其内部有未焊透缺陷存在,需对内部未焊透缺陷进行安全评定。

采用以起裂准则为基础的简化评定方法对平面缺陷进行安全评定。根据实际现场检测结果,进行缺陷规则化处理,表征得到的缺陷为长为 30 mm,深为 1 mm 的椭圆裂纹。根据国家标准 GB/T19624—2004 中表 5-5 查得此裂纹对应的等效尺寸为 1.706 4 mm。同样在最大安装应力的情况下进行安全评定,即以表 1 中 1 号测试的结果作为计算条件,同时考虑其正常工作下的内压进行数值计算,对数值计算的结果,根据 ASME 标准,对焊缝结构进行线性化处理一次薄膜应力为 89 MPa,一次弯曲应力为 19 MPa。根据标准中平面缺陷简化评定方法有

$$\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\delta/\delta_c} = 0.07 \quad (2)$$

式中: δ_r 为断裂比; δ 为裂纹张开位移值; δ_c 为材料的断裂韧度。

应力水平控制参数为 0.73,对应于标准中的平面缺陷简化评定的失效评定图可得,此应力状态下,此裂纹为安全的,但 S_r 主要是由应力水平所控制,此处 $S_r = 0.73$ 已非常接近其安全区的界限 0.8,而裂纹扩展区的界限为 $\sqrt{\delta_r} = 0.8$,此处的 $\sqrt{\delta_r} = 0.07$ 远离安全区,因而从失效评定图中同样可以看出裂纹进一步扩展的危险性主要是由应力较大所造成。

3.4 结构优化

为降低焊缝处的应力水平,对焊缝结构进行了

优化分析计算,分别进行了接管加厚结构、标准结构的应力水平比较计算。同时针对焊缝中含有未焊透缺陷结构,比较分析焊缝内含有未焊透缺陷对焊缝处应力水平影响,计算过程在最大安装应力的情况下进行对比分析。各种焊缝结构简图如图4所示。

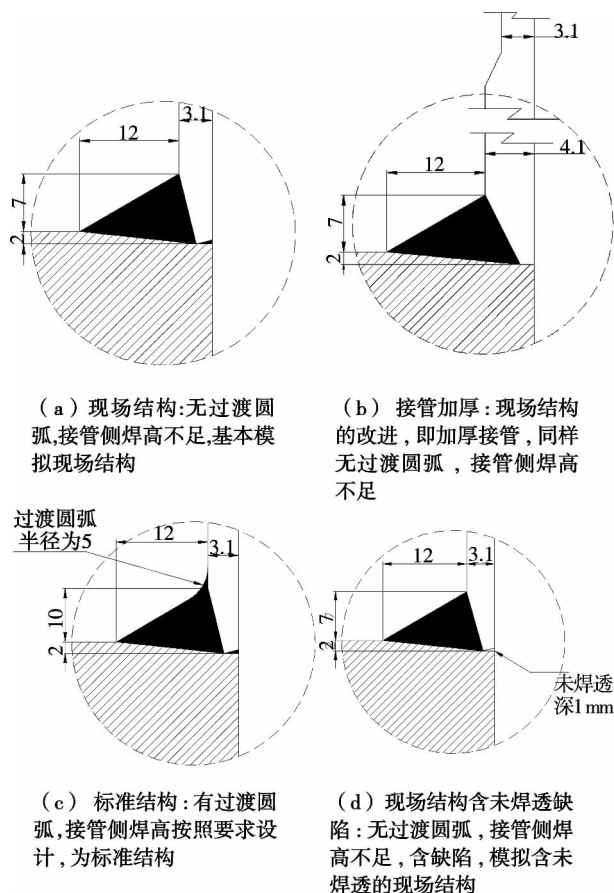


图4 不同焊缝结构的模型

Fig. 4 Different structured model of weld (mm)

通过上述的比较计算,各结构的焊缝处均存在应力集中的现象,但应力水平差异很大,其线性化后的应力值如表3中所示。从表3中的比较可知优化结构的应力水平不同程度地优于现场测试的结构。优化结构中,接管加厚较优,其应力水平降低约30%,其次是按设计要求的标准焊缝结构——即接

表3 不同模型结构的应力值

Table 3 Stress value of different weld structures

	线性化 后应力 σ_{er} /MPa	焊接 残余应力 σ_w /MPa	焊缝处总体 应力 σ_t /MPa	所允许极限 应力 σ_s /MPa	结论
现场结构	250	42.6	292.6	304.8	合格
接管加厚	177	42.6	219.6	304.8	合格
标准结构	208	42.6	250.6	304.8	合格
含未焊透缺陷	250	42.6	292.6	304.8	合格

管侧焊高增大,均可明显地降低焊缝处的应力水平。对于焊缝中含有未焊透缺陷的焊缝结构,内部的未焊透对于外部焊缝处的应力水平基本无影响。

4 结 论

(1) 通过现场应力测试与数值模拟计算相结合的方法,可以较好地预测角焊缝结构的应力水平,通过现场测试的实例验证了该方法的准确性。

(2) 该结构的内部未焊透缺陷对管座角焊缝附近裂纹的产生无明显影响,并且内部未焊透缺陷通过安全评定,结果为安全。

(3) 裂纹产生的主要原因是应力集中,焊缝的成形不佳导致了焊缝部位的应力集中,通过对结构的改良,可明显地降低焊缝处的应力水平,同时也应避免过大的安装应力,建议定期对管座角焊缝进行表面检查,对不符合相关标准的角焊缝进行处理。

参考文献:

- [1] Ottaviano G. Assessment of weld reduction factors through experimental reference curves [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77: 2971-2991.
- [2] 蒋文春, 杨 滨, 张玉财, 等. 加氢反应器 T 接管结构优化 [J]. 焊接学报, 2011, 32(6): 49-53.
Jiang Wenchun, Yang Bin, Zhang Yucai, et al. Structure optimization of T-nozzle in hydrogenated reactor [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(6): 49-53.
- [3] 史 轩. 超超临界电站锅炉结构材料焊接性能研究进展 [J]. 电焊机, 2010, 40(2): 4-9.
Shi Xuan. Development of weldability of structural materials for ultra-supercritical power boilers [J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(2): 4-9.
- [4] 黎超文, 王 勇, 韩 涛. 焊接顺序对 T 形接头残余应力和变形的影响 [J]. 焊接学报, 2011, 32(10): 37-40.
Li Chaowen, Wang Yong, Han Tao. Effect of welding sequences on welding residual stress and distortion of T-joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(10): 37-40.
- [5] 李国成, 刘仁恒. 压力容器安全评定技术基础 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2007.
- [6] 姜运建, 荆洪阳, 徐连勇, 等. 焊接残余应力对 P92 钢 IV 型蠕变开裂的影响 [J]. 焊接学报, 2011, 32(1): 16-20.
Jiang Yunjian, Jing Hongyang, Xu Lianyong, et al. Effect of welding residual stress on type IV creep failure of P92 steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(1): 16-20.
- [7] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2 [S]. New York: the American Society of Mechanical Engineers, 2007.

作者简介: 刘富君,男,1976 年出生,博士,高级工程师。主要从事特种设备安全、特种设备风险评估与寿命预测研究。发表论文 50 余篇,被 SCI 和 EI 收录论文 20 余篇,获专利 3 项,其中发明专利 1 项。Email: lfj_dq@126.com.

show that the analysis result is closer to the actual situation by considering the phase transition on the thermal expansion coefficient.

Key words: dual-phase steel; phase transition; numerical simulation; stress fields; deformation

Effect of maximum loading on cycling mechanics behavior of micro-soldered joints by nanoindentation method

WANG Lifeng, LÜ Ye, DAI Hongbin, ZHANG Pule (College of Material Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China) . pp 75 – 78

Abstract: Through the cyclic load-unload test of nano-indentation method, the effects of maximum load on cycling mechanics behavior for two kinds micro-solder joints of Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu and Sn-0.3Ag-0.7Cu/Cu were investigated. The results indicated that the cycling $F-h$ curves that before closed showed a hysteresis loop. The area of hysteresis loop and indentation residual depth of micro-soldered joints increased with the increase of the maximum load. The cumulative damage of micro-soldered joints increased. When the maximum load was given, the area of hysteresis loop and increments of residual indentation depth decreased gradually with the loading time increasing. Indentation creep C of micro-soldered joints decreased with the increase of the maximum load. At the same time, indentation creep C of micro-soldered joints sharply decreased at first and then plateaued with the loading time increasing. Indentation creep C of Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu micro-soldered joint was less than that of Sn-0.3Ag-0.7Cu/Cu micro-soldered joint.

Key words: nano-indentation method; micro-soldered joint; cycle load-unload; creep

An inverse analysis method to estimate inherent deformation in T-fillet welded joints

LIANG Wei, Murakawa Hidekazu (1. College of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Osaka 567-0047, Japan) . pp 79 – 82

Abstract: The prediction method based on inherent strain theory has been regarded as an effective way to estimate welding deformation for large and complex structures. However, when this method is used to simulate welding deformation in a large or complex structure, the values of inherent deformations in each typical joint must be known beforehand. In the present study, based on the combination of experiential mensurement and numerical simulation, a new inverse analysis method was proposed to obtain the inherent deformations for T-fillet welded joints. By using the inherent deformation obtained by the proposed method, the welding distortion in a low carbon steel T-joint was predicted by means of a forward elastic finite analysis based on inherent strain theory. Through comparing the simulated results and the measured data, the prediction accuracy and effectiveness of the inverse analysis method were verified.

Key words: inherent strain finite element method; welding distortion; inherent deformation; inverse analysis

Study on security analysis method for tube filled weld on power boiler set box

LIU Fujun, TANG Ping, LING Zhanwei, XIA Junfang (Zhejiang Provincial Special Equipment In-

spection and Research Institute, Hangzhou 310020, China) . pp 83 – 86

Abstract: Crack defect is often found in tube filled weld on power boiler set box, which usually causes pipe leakage. In order to avoid this defect, numerical simulation of the tube filled weld was carried out. In this paper, causes of crack were discussed and the influence of the incomplete fusion defection was studied. Then the validity of security analysis method for tube filled weld was proved, and the scientific basis was provided for the overhaul of the power station.

Key words: power boiler; fillet weld; stress test; defects assessment; numerical simulation

Effect of Al on properties of Zn-Al filler metal brazing 2A01 Al-alloy

ZHANG Man^{1,2}, WANG Pengfei¹, ZHANG Lincai¹, XU Hongbin¹ (1. Department of Mechanical Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory for Interventional Medical Devices, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China) . pp 87 – 90

Abstract: Effects of Al on the spreadability of Zn-Al filler metal on 2A01 Al-alloy surface were investigated. The strength and microstructure of the brazed joints have been studied. The results indicate that spreadability is improved with the increase of Al content in the filler metal. When the content of Al is 12% , the filler metal gets the best spreadability on 2A01 Al-alloy surface. However, the spreadability decreases when the content of Al exceeds 12% . When the content of Al is in the range of 8% ~ 15% , the spreadability of filler metals is excellent. Furthermore, the mechanical property test of brazed butt-joint results indicate that the strength of 2A01 Al-alloy butt joint is improved with the increase of the content of Al in the filler metal. The highest strength of the brazed joint is obtained when the content of Al is about 8% . However, when the content of Al exceeds 8% , the dendritic eutectoid structure becomes large in the brazing seam. Stress concentration emerges between large dendritic eutectoid structure and its surrounding structure. The strength of the brazed joint decreases gradually. The optimum content possessing best comprehensive properties is 92Zn-8Al filler metal.

Key words: Zn-Al filler metal; 2A01 Al-alloy; brazing; spreadability; mechanical property

Reliability analysis of plastic ball grid array double-bump lead-free solder joint under thermal cycle

WEI Hegeng¹, HUANG Chunyue¹, LIANG Ying², LI Tianming³, WU Song¹, GUO Guangkuo¹ (1. School of Electro-Mechanical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Department of Electronic Engineering, Chengdu Aeronautic Vocational and Technical College, Chengdu 610021, China; 3. Department of Automobile and Power Engineering, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China) . pp 91 – 94

Abstract: The plastic ball grid array (PBGA) double-bump lead-free solder joint stress and strain distribution under the thermal cyclic loading was analyzed based on the stress-strain finite element analysis model, and then the thermal fatigue life was calculated. The impacts of solder joint height, solder joint maximum radial size on fatigue life were also studied. The results