

单排径向拉拔管集箱的应力分析与评定

汪建平¹, 汪秀敏², 高增梁³

(1. 浙江工业大学 浙西分校, 浙江 衢州 324000; 2. 宁波工程学院, 浙江 宁波 315000;

3. 浙江工业大学 化工机械设计研究所, 浙江 杭州 310032)

摘 要: 在操作工况 2.2 MPa 的条件下, 对新型对接焊的单排径向拉拔管集箱进行了有限元分析及应力测定, 将两者结果进行比较和分析评定, 得出单排径向拉拔管集箱的有限元计算与实测应力分布的结果基本一致, 最大应力位于管集箱拉拔头拐角处, 应力满足强度要求, 疲劳寿命超过 10^6 周期。

关 键 词: 拉拔管集箱; 有限元分析; 应力测定; 应力强度; 疲劳寿命

中图分类号: O346 文献标识码: A

引 言

在以天然气为原料的火力发电机组中, 管集箱是余热锅炉、加热炉和热交换器中使用的常见部件。在一般的管集箱中, 管子和接头采用角焊缝连接, 在角焊缝处存有较高的应力集中区。同时, 该焊缝可能会出现裂纹类缺陷, 采用无损检测手段很难检测到这些缺陷。因此, 管头连接处由于结构强度、疲劳等原因^[1~2], 容易出现开裂泄漏, 所以管集箱与管子接头的角焊缝是整个管集箱的薄弱部位。为了提高管集箱的使用性能, 可采用一种新型的对接焊缝的拉拔管集箱方式, 如图 1 所示。在拉拔管头上端, 接管与管头连接采用对接焊, 焊接质量容易保证, 特别是焊缝避开了应力集中区。由于其具有尺寸精度高, 良好的表面质量和可靠的力学性能等优点, 拉拔管集箱已逐步在工程中推广应用。因为拉拔管集箱是一种新的受压元件, 为了对集管箱的强度设计和分析提供依据, 对其进行应力分析和评定就显得十分必要。本研究就发电厂的余热锅炉单排拉拔管集箱, 进行了有限元分析和应力测定, 在正常操作工况条件下, 对其进行了应力强度和疲劳寿命评定。

1 拉拔管集箱结构及其技术参数

拉拔管集箱有几种不同结构形式, 如单排径向

拉拔管集箱、双排非径向拉拔管集箱或双排径向成 90° 拉拔管集箱和相邻管呈 30° 的 3 排径向拉拔管集箱。本研究主要对单排径向拉拔管集箱进行分析。

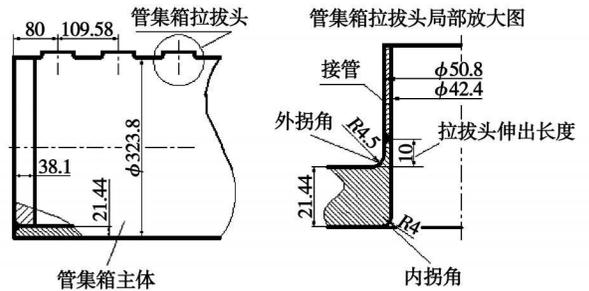


图 1 单排径向拉拔管集箱

图 1 为单排径向拉拔管集箱, 主体尺寸为 $\varnothing 323.8 \times 21.44$ mm。接管的尺寸为 $\varnothing 50.8 \times 4.2$ mm。正常操作压力为 2.2 MPa, 操作温度为 557 °C。拉拔管集箱及接管材料为 SA 335-P91, 材料性能查 ASME 锅炉和压力容器规范, 结果如表 1 所示^[3]。

表 1 SA335-P91 材料基本性能

	性能参数						
	25	200	300	400	450	550	650
温度 $T/^\circ\text{C}$	25	200	300	400	450	550	650
抗拉强度 R_m/MPa	586.2	584.3	574.7	529.3	492.7	378.5	
屈服强度 R_e/MPa	413.8	377.3	376.1	354.5	335.2	268.5	
弹性模量 $E/$ $\text{MPa} (\times 10^5)$	2.13	2.00	1.94	1.83	1.76	1.54	1.26
许用应力 S_m/MPa	167.6	166.9	163.9	150.9	140.5	108.3	28.92
线膨胀系数 $\alpha/$ $^\circ\text{C}^{-1} (\times 10^{-6})$	10.62	11.33	11.65	11.97	12.14	12.46	
导热系数 $\lambda/$ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	22.7	26.23	27.33	27.77	27.86	27.86	27.39
热扩散系数 $a/\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$	399.5	401.3	382.4	352.4	333.9	292.3	239.5

收稿日期: 2008-01-21; 修订日期: 2008-05-21

基金项目: 国家 863 基金资助项目(2007AA04Z430); 国家“十一五”支撑基金资助项目(2006BAK02B02)

作者简介: 汪建平(1955-), 女, 江苏泗洪人, 浙江工业大学副教授。

2 应力测定

根据管集箱的结构分析,管集箱主体外径为 $\phi 323.8 \times 21.44$ mm。管集箱拉拔头的拐角部位由内外圆角过渡,如图 1 所示,其内外圆角分别为 $R 4.5$ 和 $R 4$,拉拔头部的最小壁厚为 4.2 mm。因此,管集箱拉拔头是整个管集箱的薄弱部位,应力测定的测试主体为管集箱拉拔头拐角附近的应力分布,应变片为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,采用 1/4 桥,由一块与管集箱管材相似的钢板进行温度补偿。应力测试选择了 18 个测点,其中在拉拔管外壁拐角处,5 个测点采用了 $0.45^\circ, 90^\circ$ 三个方向的应变片,而在其它区域,则使用了两个方向的应变片。

测试系统中,采用水为加压介质,由试压泵提供压力,管集箱受压后,应变片发生电阻变化,将应变片导线连接至 YE2900 应变数据采集箱,并把 YE2900 应变数据采集箱与 YE2530 程控静态应变仪连接,加卸载压力分三级达到 2.2 MPa,将各级压力下的应变数据采集保存后,输入电脑进行数据处理。根据虎克定律,实测的二向应变按下式换算成二向应力:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_x + \mu\epsilon_y) \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_y + \mu\epsilon_x) \end{cases} \quad (1)$$

式中:材料的弹性模量 $E = 2 \times 10^5$ MPa

材料的泊松比 $\mu = 0.3$

在管集箱拉拔头外拐角处的应变片所测得的应变值,用下式计算出双向应力和剪应力:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_x + \mu\epsilon_y) \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_y + \mu\epsilon_x) \\ \sigma_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)}[2\epsilon_{45^\circ} - (\epsilon_x + \epsilon_y)] \end{cases} \quad (2)$$

用下式计算该位置的二向主应力 S_1, S_2 :

$$\begin{cases} S_1 \\ S_2 \end{cases} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\sigma_{xy}^2} \quad (3)$$

3 有限元分析

为了与实测应力进行分析比较,采用 ANSYS 有限元分析软件,对管集箱拉拔头结构进行应力分析计算。由于拉拔管集箱载荷和结构的对称性,可沿管

集箱主体的轴向建立一半拉拔管集箱的三维有限元模型,模型中包含了管集箱拉拔头和 3 根支管,整个结构的有限元模型采用八节点固体单元,共建有 10 024 个单元、16 431 个节点,该有限元模型如图 2 所示,对称约束应用于对称边界节点,故这些节点上的位移和转角被约束。

有限元分析中的载荷,是正常操作 2.2 MPa 工况下,经计算应力最大值位于管集箱拉拔头的内拐角处,最大主应力为 56.49 MPa,应力强度及各主应力如表 2 所示。

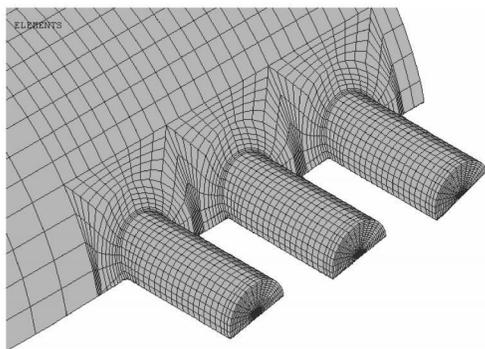


图 2 单排径向拉拔管集箱有限元分析(FEA)模型

4 有限元计算与实测应力分析

在操作压力 2.2 MPa 工况下对单排径向管集箱的应力和应变进行了有限元计算,计算结果拉拔管集箱的最大主应力位于管集箱拉拔头的内拐角处,该内外拐角处的应力强度和最大主应力如表 2 所示,最大应力指数高于 3。

将单排径向管集箱拉拔头外壁拐角区域的实测应力和有限元分析结果进行比较,如图 3 所示,(图中横坐标为管集箱主体轴向长度和拉拔头及接管的轴向展开长度,纵坐标为主应力),有限元分析应力和实测应力的分布较接近,但实测应力数值均位于有限元计算的分布曲线下面,这是因为管壁较厚,在内压作用下外壁的实测应变值比实际的小。同时,在拐角处应变片很难准确贴到应力的最大点处。

由图 3 的 S_1, S_2 主应力分布曲线看出,管集箱拉拔头区域的应力集中范围较小。在管集箱主体侧 S_1 曲线至 25 mm 即成水平, S_2 曲线至约 5 mm 处保持不变;在拉拔头侧,管拔头伸出 10 mm 处 S_1 和 S_2 已趋于平坦。这说明管集箱拉拔头的高度不需要太高,即可避开应力集中区。因此,该拉拔头的高度为 10 mm 是合理的。

远离拉拔头的接管和管集箱主体部分的应力称为一次总体膜应力 P_m 。在 2.2 MPa 的操作压力下, 管集箱的最大应力强度为 54.54 MPa, 比管材 SA335-91 在 557 °C 时的许用应力 103 MPa 要小得多。表明管集箱的主体结构强度是足够的。在管集箱拉拔头拐角处, 存在一次总体膜应力 P_m 、二次应力 Q 和峰值应力 F 。限制拐角处总应力为 $3S_m^{[5]}$ 。拐角的最大应力强度为 54.54 MPa 比 $3S_m = 309$ MPa 小得多。因此, 管集箱拉拔头的拐角处强度也满足要求。

表 2 内压为 2.2 MPa 时, 单排管集箱拉拔头内外拐角处有限元计算(FEA)的应力和应力指数

位置	S_{INT}/MPa (应力指数)	S_1/MPa (应力指数)	S_2/MPa (应力指数)	S_3/MPa (应力指数)
轴向内拐角	54.54 (3.51)	56.49 (3.64)	2.51 (0.16)	1.95 (0.13)
轴向外拐角	26.23 (1.69)	28.28 (1.82)	8.72 (0.56)	2.05 (0.13)
周向内拐角	5.70 (0.37)	3.59 (0.23)	-1.14 (-0.07)	-2.11 (-0.14)
周向外拐角	24.20 (1.56)	23.16 (1.49)	12.23 (0.79)	-1.04 (-0.07)

注: 轴向拐角和周向拐角都是以管集箱主体轴线为基准

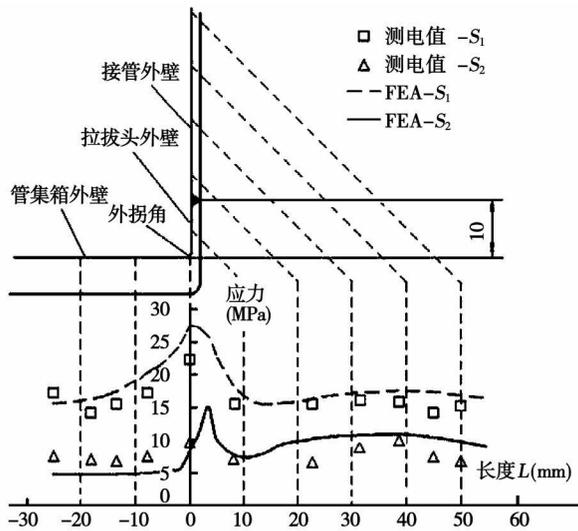


图 3 内压为 2.2 MPa 时, 单排管集箱拉拔头外拐角区域实测应力和有限元分析(FEA)比较

5 疲劳评定

拉拔管集箱用在天然气发电厂中的调节电网, 管集箱经常启动和关闭, 因此, 接头的疲劳损伤是一个必须应该考虑的问题。接头的负载周期分为无负载和正常运行工况。在负载周期内, 应力和方向不断改变。根据 ASME 锅炉和压力容器规范^[5], 对管集箱结构的疲劳寿命进行评定, 它的最大交变应力强度也是位于管集箱拉拔头拐角处。

$$S_{alt} = \frac{(\Delta S_{INT})_{max}}{2} = \frac{54.54}{2} = 27.2 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$\text{最大应变大小为 } \epsilon_a = \frac{S_{alt}}{E} = 1.89 \times 10^{-4} \quad (5)$$

在 ASME-III-NH 中没有 SA335-91 的疲劳设计曲线^[6], 本研究采用了相似材料 SA335-P22 的疲劳曲线(图 T-1420-1D)。由该曲线查得管集箱的疲劳寿命超过 10^6 周期, 疲劳寿命也是足够的。

6 结论

(1) 对一种新型对接焊缝的单排径向拉拔管集箱进行了有限元分析和应力测定。结果证明, 有限元计算二向主应力分布趋势与实测应力基本一致, 单排径向管集箱的最大应力位于管集箱拉拔头拐角处;

(2) 采用对接焊缝的拉拔管集箱, 在拉拔管头上端与管接头采用对接焊, 管集箱拉拔头区域的应力集中范围不大, 焊缝已避开应力集中区, 其结构是合理的;

(3) 由于该管集箱经常启闭是属于周期间歇操作, 压力载荷属全幅变化, 但应变幅不大, 故经疲劳评定, 管集箱的疲劳寿命超过 10^6 周期。

参考文献:

[1] 洪文健, 廖景娉, 梁思祖. 过热器出口集箱失效分析[J]. 压力容器, 2000, 17(3): 61-64.
 [2] 刘宪金. 过热器集箱管座角焊缝裂纹的分析及处理[J]. 内蒙古电力技术, 2003, 23(1): 35-37.
 [3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. II, Part. D, 2001 [S].
 [4] GB/T 9222-1988 水管锅炉受压元件强度计算[S].
 [5] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. VIII Div. 2, 2001 [S].
 [6] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III NH, 2001 [S].

(编辑 单丽华)

单排径向拉拔管集箱的应力分析与评定 = **Stress Analysis and Evaluation of a Single-row Radial-drawn Tube Header** [刊, 汉] / WANG Jian-ping (West Branch of Zhejiang University of Technology, Quzhou, China, Post Code: 324000), WANG Xiu-min (Ningbo University of Technology, Ningbo, China, Post Code: 315000), GAO Zeng-liang (Chemical Machinery Design Research Institute, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, China, Post Code: 310032) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 539 ~ 541

Under the operating condition featuring a 2.2 MPa pressure, a finite element analysis and stress measurement have been conducted of an innovative butt-welded single-row radial-drawn tube header. The results of the analysis and measurement have been compared and analytically evaluated for the header in question. It is found that the finite element calculation result is in basic agreement with that of the actually measured stress distribution. A maximum stress occurs at the corner of the drawn head of the tube header. However, the stress can meet strength requirements and the fatigue life exceeds 10^6 cycles. **Key words:** drawn tube header, finite element analysis, stress measurement, stress strength, fatigue life

PEM 燃料电池供电系统“单耗分析”及其减排效应 = “**Specific Consumption Analysis**” and **Emission-reduction Effect of a Proton-exchange-membrane (PEM) Fuel-cell Power Supply System** [刊, 汉] / YAN Qin, YANG Yong-ping, XU Er-shu, ZHAI Rong-rong (Education Ministry Key Laboratory on Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 542 ~ 546

On the basis of a description of the working principle, properties and composition of a power supply system of proton-exchange-membrane fuel-cells (PEMFC) pertaining to a low-temperature fuel cell series, a segment division of the system in question was conducted by using the “specific consumption analysis” theory, establishing respectively analytic models for fuel specific consumption and cost specific consumption. With the operating data of a real PEMFC power supply system serving as a basis, a specific consumption analysis was conducted of the system and the emission-reduction effect of greenhouse gas CO_2 and pollutant NO_x , also analyzed by comparing with the power supply from a large electric grid. The results of the study show the influencing degree of the exergy efficiencies in various links of the PEMFC power supply system on fuel specific consumption and cost. The annual CO_2 emission-reduction rate of the system in power generation and supply approximates to 25% and NO_x emission-reduction rate is over 99.96%, thus, exhibiting relatively bright development prospects. **Key words:** proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), specific consumption analysis, emission-reduction effect

硫化氢高温裂解制氢的动力学研究 = **Kinetics Study of Hydrogen Preparation from a Pyrolysis of Hydrogen Sulfide** [刊, 汉] / LING Zhong-qian, ZHOU Hao, QIAN Xin-ping, CEN Ke-fa (National Key Laboratory on Clean Utilization of Energy Source, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 547 ~ 550

To investigate the mechanism governing hydrogen preparation from a pyrolysis of hydrogen sulfide, a kinetic model has been established, and kinetic simulation results and test data have been compared with the thermodynamic calculation results. The kinetic model thus established can simulate comparatively well the hydrogen preparation process from the pyrolysis of hydrogen sulfide. The calculated results are in comparatively good agreement with the test data and the thermodynamic calculation results. The results of the study show that with the rise of cracking temperature, the conversion rate of hydrogen sulfide and the production rate of hydrogen will be remarkably enhanced, reaching 56.8% and 10.6% respectively at 1250 °C. When the cracking temperature is lower than 1050 °C, with a longer residence time, the conversion rate of hydrogen sulfide and the production rate of hydrogen will also markedly increase. When the temperature is higher than 1050 °C and the residence time has exceeded 0.2 second, the influence of the residence time on the conversion rate of hydrogen sulfide and the production rate of hydrogen will be very small. **Key words:** hydrogen sulfide, hydrogen preparation, pyrolysis, kinetics