基于有限元模拟的高温过热器弯头短期失效探析

樊晓红,林荣川
(集美大学 机械工程学院,福建 厦门 361021)

摘要:对某600 MW超临界机组高温过热器弯头在运行不到1 000 h发生开裂现象进行了外观检查、显微分析,同时对冷弯成型工艺过程进行数值模拟。研究表明:亚稳态不锈钢TP347H冷弯成形时内弧应变量超过ASME规范要求,产生马氏体相变,形成点蚀源,在残余应力与高温运行时热应力的共同作用下引起的内弧面开裂是弯头寿命降低的主要原因。

关键词:过热器弯头;内弧面;冷弯成形;数值模拟;残余应力
中图分类号:TG386.31　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-5322(2012)01-0029-04

过热器是锅炉的主要组成部分,是锅炉中金属壁温最高的受热面,所处的工作环境最恶劣。TP347H(1Cr19Ni11Nb)属于高碳含铌奥氏体不锈钢,铌与碳生成的碳化物可以产生沉淀强化作用[1],因而广泛用于超临界电站锅炉高温过热器管道中。弯头由于其在锅炉管道中所处位置及自身的弯制工艺,工作环境比直管段更为恶劣,是整个管道系统中最薄弱环节。因此对弯管段的研究对于整个管道系统的安全有着重要的意义。文献[2-7]以事实及试验为依据,对一些过热器失效个案进行分析,无损检测手段也能及时了解及判断管道各部位的损伤情况。文献[8]对含局部减薄弯头进行了非线性有限元分析。文献[9]研发出一种用于电厂锅炉弯管质量控制的计算机集成系统,应用结果表明通过有限元的方法可以较好地预测弯管质量。本文就某锅炉厂600 MW超临界机组高温过热器弯头在运行不到1 000 h发生开裂现象,结合试验方法和有限元模拟进行失效分析。

1 试验条件

试验用锅炉:600 MW超临界锅炉机组。

过热器弯头材料:亚稳态不锈钢TP347H,组成见表1。

表1 亚稳态不锈钢TP347H化学成分

Table 1 Chemical composition of metastable stainless steel TP347H　　%

元素	质量分数
Si	0.49
V	0.11
Cr	18.91
Mn	1.74
Fe	68.07
Ni	9.82
Nb	0.73
Mo	0.13

检验设备:美国FEI公司生产SIRION TMP型场发射扫描电子显微镜。

弯管弯制工艺:采用回转式弯管机冷弯成型,弯管外观照片、尺寸及试样选取见图1。

2 试验结果

2.1 试样外观分析

通过无损检测,发现弯头内弧面有裂纹产生。由图1可以看出,弯头裂纹部位没有明显减薄及塑性变形,裂纹扩展面为周向开裂的脆性断面。

2.2 裂纹处内外弧面显微组织

通过扫描电镜对内外弧面裂纹处进行显微组

收稿日期:2011-02-17
基金资助:福建省自然科学基金资助项目(2009J01259)
作者简介:樊晓红(1974-),女,江苏建湖人,讲师,硕士,主要研究方向为材料成形。

万方数据

万方数据

拟设为两步，第 1 步，压块向下运动，移动速度为 10 mm/s，把管件压紧在弯曲模上，以防止在弯管过程中钢管滑动回缩。第 2 步，弯曲模与压块一起带着管件转动 90°，转动角速度为 0.5 rad/s，进行绕弯成型。

3　基于有限元模拟的分析与讨论

3.1　弯管成形时的应变分析

ASME 锅炉及压力容器规范 I，动力锅炉建造规则 PG - 19（奥氏体材料的冷加工成型应变范围和热处理要求）中对 TP3437H 弯管加工作出了规定：当设计的金属温度为 538 ~ 676 ℃时，不需要热处理的成型应变为 15% 以下；当设计的金属温度高于 676 ℃时，成型应变降为 10%。由此可以看出管道工作温度越高，允许的成型应变量越低。

弯头加工应变按式（1）计算：

$$应变\ \% = \frac{100\ r}{R} \qquad (1)$$

式中：r = 管公称外半径 R = 管子中心线公称弯曲半径 将 r = 22.5 mm，R = 150 mm 代入式（1）得应变为 15%，该值为管头平均应变量。由图 5 所示应变模拟结果可以看出，弯管内外弧面的应变范围为 8% ~ 23%，较大的塑性变形必将导致弯头处产生马氏体相变。由于内弧面弯曲程度比外弧面变形程度大，弯头内弧面产生的马氏体相变量比外弧面高。奥氏体转变为马氏体组织的过程中产生了大量的位错、空位和显微裂纹等缺陷，成为点蚀源而诱发腐蚀。

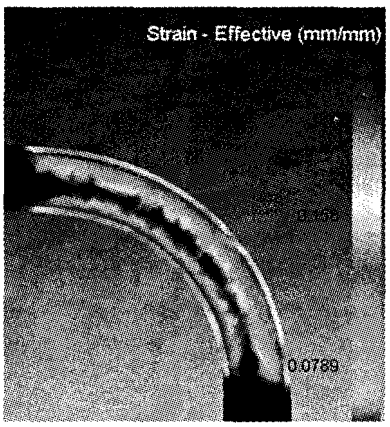

图 5　等效应变分布图

Fig. 5　FE simulation result of equivalent effective strain

3.2　弯曲成形中的应力分析

弯头外弧面多发生蠕变裂纹，而应力腐蚀裂纹则起于中性区内壁[10]。弯头裂纹的形成原因较为复杂，裂纹源点存在最大局部应力是导致弯头寿命远远低于直管的主要原因之一，因而研究弯头应力分布情况十分必要。弯管时，管道外侧减薄内侧增厚、起皱和横截面变化过程是技术难题。弯头的应力构成较为复杂，文献[10 - 12]通过理论计算及试验的方法对弯管应力进行了研究。而利用近年来发展迅速的有限元法，可以准确快捷地获得相关信息。

根据数值模拟结果测得弯头各截面处壁厚如图 6 所示（模具设计中已经增加了反变形轮，以减小弯曲过程中的变形，提高弯管质量）。这是因为在弯曲过程中，钢管经历了外侧壁厚减薄和内侧壁厚增厚。壁厚不均匀造成了应力分布不均匀及应力集中。图 7 所示为弯曲成形 90°时弯管表面等效应力的分布情况。不难看出，最大等效应力分布在弯曲平面内大约70°转角处较小一段

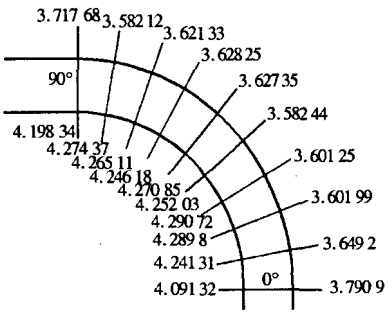

图 6　管各截面内外弧面壁厚

Fig. 6　Wall thickness of the tube's sections at different angles

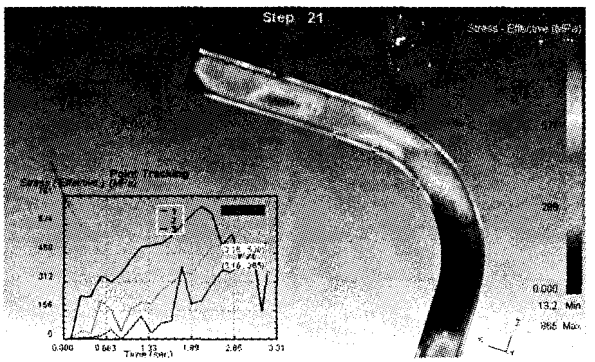

图 7　有限元模拟等效应力分布图

Fig. 7　FE simulation result of equivalent effective stress

万方数据

区域内。虽然最大等效应力值(865 MPa)位于外弧面,但由图3所知,外弧面没有粗大析出物,不存在裂纹源点。由点追踪应力图可以看出,内弧面约70°转角处等效应力值为743 MPa,与高温运行时热应力共同作用,使得内弧面最容易产生裂纹。这与弯头上实际裂纹位置相吻合,也正是前面试验取样部位。

4 结论

研究结果表明,残余应力与高温运行时产生的热应力共同作用在过热器弯头内弧面粗大析出物上是导致弯头内侧约70°转角处产生短期裂纹的主要原因。

参考文献:

[1] 陆世英,张廷凯,康喜范. 不锈钢[M]. 北京:原子能出版社,1995.

[2] 郑相锋,冯砚厅,牛晓光,等. 超临界锅炉顶棚过热器弯管断裂失效分析[J]. 热加工工艺,2011,40(22):201-202.

[3] 张而耕,王琼琦,关凯书,等. 过热器爆管原因的失效分析[J]. 压力容器,2009,26(5):44-50.

[4] 龙会国,陈红冬. TP304锅炉管运行泄漏原因分析[J]. 腐蚀科学与防护技术,2010,22(6):551-554.

[5] Das Goutam, Chowdhury, Sandip Ghosh, et al. Failure of a super heater tube[J]. Engineering Failure Analysis, 2002,9(5):563-570.

[6] 马官兵,李晓红,谢阿萌. 锅炉高温受热面TP347H管短期开裂分析[J]. 武汉大学学报:工学版,2007,40(3):80-84.

[7] 陶杰,刘红兵. 金属管件冷成形技术研究进展[J]. 机械制造与自动化,2009,38(4):1-5.

[8] 杨秀娟,安瑜,闫相祯. 含局部减薄弯头的非线性有限元分析[J]. 广西大学学报:自然科学版,2009,34(1):45-49.

[9] Lai Y N, Ren S L, Yu Y T. Design and development of integrated system on CAD/CAE/CAPP for tube-bending in power plants boiler[J]. Key Engineering Materials. 2009, V392-394:957-961.

[10] 王行山. 弯管在内压及平面内弯矩作用下的应力分析及试验研究[J]. 电力建设,1983,8(2):11-13.

[11] 徐方成,蒋家羚,林兴华,等. 内压作用下弯管应力的实验研究[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2000,39(5):617-621.

[12] 蒋家羚,王勇. 电厂蒸汽管弯管应力计算和疲劳行为的研究[J]. 动力工程,2002,22(1):1 650-1 653.

Short-dated Failure Analysis of High Temperature Super-heater Elbow Based on the Finite Element Simulation

FAN Xiao-hong, LIN Rong-chuan

(Mechanical Engineering College of Jimei University, Xiamen Fujian 361021, China)

Abstract: A macrostructure examination and scanning electron microscopy analysis was made on the failure of the high-temperature super-heater elbow which was operated less than 1 000 h. The process of pipe cold bending was simulated. It shows that: the forming strain at the intrados of metastable state stainless TP347H steel, while bending exceeded ASME standard, causes martensitic phase transformation. It was the pitting source of the tube. The intergranular fracture which was caused by both the residual stress and the heat stress acted on the coarse precipitate at the intrados is the main reason of the drop of the elbow life.

Keywords: super-heater elbow; intrados; cold bending; numerical simulation; residual tensile stress

(责任编辑:沈建新)

万方数据