

电站锅炉蛇形管焊接接头加速寿命试验规范的研究

赵继俊¹, 邹经湘², 徐世斌³

(1. 哈尔滨工业大学 汽车学院, 山东 威海 264200; 2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 哈尔滨锅炉厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150046)

摘 要: 研究制定了旨在研究电站锅炉蛇形管焊接接头可靠性的加速寿命试验的试验规范, 在此基础上, 对大量的 15CrMo 和 12Cr1MoV 钢摩擦焊管接头进行了高温内压爆破持久试验。通过对试验结果的分析处理, 证明了在各种加速试验工况下焊接接头的失效机理是一致的, 同时也说明了试验规范是可行的。

关 键 词: 加速寿命试验; 试验规范; 焊接接头; 可靠性

中图分类号: TM621.2 文献标识码: A

1 引 言

为探索产品在各种工况下的可靠性指标, 验收及鉴定产品的质量, 必须对产品进行寿命试验。在电站锅炉的设计中, 以金属材料 100 kh 的持久强度值作为设计依据, 欲了解焊接接头的高温持久强度性能和可靠性指标, 在试验室中不可能进行这样长时间的高温试验。因此, 在保证失效机理不变的前提下, 采用加速寿命试验, 来研究长寿命产品的可靠性问题是一种有效的方法。

2 加速寿命试验方法

加速寿命试验可分为三种类型: (1) 恒定应力加速寿命试验; (2) 步进应力加速寿命试验; (3) 序进应力加速寿命试验。其中以第一种方法应用最多, 理论也最成熟。

恒定应力加速寿命试验, 概括地说, 就是在高于(根据需要可等于甚至低于)正常应力水平的几个应力水平下, 分别投入若干试件进行寿命试验。由于本文研究的焊接接头是工作在高温、高压的环境中, 温度和压力对焊接接头的失效都有促进作用。因

此, 这里所指的应力既包括机械应力(简称应力)又包括温度应力(简称温度)。这就是说, 本文所研究的持久强度寿命试验是以应力和温度双加速的加速寿命试验。

3 加速寿命试验规范制定

试验规范即在试验过程中应遵循的原则, 进行大批量、长时间的高温、高压持久强度试验, 制定一套细致、严密、科学的试验规范是非常必要的。一个完整的试验规范应包括如下内容。

3.1 应力范围的确定

最低应力—外推的持久强度与使用应力都较低, 如果试验的应力水平都高于它们, 则很难保证外推的有效性。这就要求试验应力水平的最低者, 必须低于或等于预计的外推或使用值。

最高应力—根据专业经验, 把预计的承载寿命和温度结合, 综合考虑后确定。

3.2 温度范围的确定

由于在实验室中进行加速寿命试验, 目的是要缩短失效时间, 有些工况的应力水平较低, 更需要考虑用提高温度来加速试验。这一方面要注意的问题是保证加速试验的有效性, 同时还要考虑温度提高后对试件材料组织结构及氧化程度的影响。过去有人认为参数法外推, 试验的最高温度至少低于回火温度 50 °C, 由文献[1~2]可知, 这个温度过高, 对于锅炉用钢, 最高温度高出使用温度约 50 °C 为宜, 最低温度应略低于或等于最低使用温度。

3.3 应力分档方法

收稿日期: 2002-01-24; 修订日期: 2002-08-14

基金项目: 原机械工业部技术发展基金资助项目(90150801)

作者简介: 赵继俊(1960-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学(威海)教授, 博士。

对于持久强度参数法外推, 根据外推公式中系数的个数, 应力以分 4 或 5 档为宜。因为应力和承载寿命间呈递幂率关系, 所以当最低应力 σ_1 和最高应力 σ_k (k 为应力分档个数) 确定后, 其它档次的应力 σ_i ($i = 2, 3, \dots, k-1$) 应按式(1)确定

$$\lg \sigma_i = \lg \sigma_{i-1} + (\lg \sigma_k - \lg \sigma_1) / (k-1) \quad (1)$$

3.4 温度分档方法

与应力分档相似, 以 4 或 5 档为宜, 并考虑试验机的控温精度。因为温度与承载寿命间符合 Arrhenius 方程, 当最低和最高温度 T_1 和 T_k 确定后, 其它档次温度 T_i ($i = 2, 3, \dots, k-1$) 应按式(2)确定

$$\frac{1}{T_i} = \frac{1}{T_{i-1}} - \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_k} \right) / (k-1) \quad (2)$$

为使试验执行方便, 式(1)和式(2)的计算结果可就近圆整到适当的整数值。

3.5 试件的投入数

对同温度同应力下, 若一组试件的寿命分布已知, 试件数可适当减少。但为了求出承载寿命 t 的数字特征量, 每组试件数不应少于 4 个。为了更好地探索应力和温度对寿命 t 的影响, 每个温度档应安排两组不同应力的试件。

3.6 最长的试验时间

为保证外推持久强度的准确性, 最长的试验时间(承载寿命)应不少于外推时间的 1/10 或 1/3。为防止试件高温氧化, 长期试件以试验温度低者为宜。

3.7 试验结果的统计检验方法

按一般加速试验理论, 为保证外推的结果真实、有效、可靠, 其应力水平的破坏机理要保持一致。从理论上讲, 各应力水平的承载寿命, 如果服从或近似服从对数正态分布时, 对数标准差要相同。如果服从或近似服从威布尔分布, 在不同应力水平下形状参数应保持不变。根据文献[1, 3]的结论, 15Cr1Mo 和 12Cr1MoV 两种材料的高温持久寿命均服从对数

正态分布, 所以试验后要把温度及应力都相同的各组试验数据对数标准差求出, 并进行比较, 以检验失效机理是否相同。试验数据对数标准差 S 是否相同, 可用线性回归方法也可用最大分散比 S_{\max}^2 / S_{\min}^2 来检验^[4]。

4 试验方案的制定和数据分析处理

4.1 试验方案的制定

本试验研究所用试件分为两种, 一种是由哈尔滨锅炉厂有限责任公司专为试验而制的 15Cr1Mo, $\Phi 42 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 摩擦焊管接头。另一种是取自大庆新华发电厂运行温度 $540 \text{ }^\circ\text{C}$, 管内介质压力为 10 132 kPa, 已运行 132 kh 的 12Cr1MoV, $\Phi 42 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 过热器摩擦焊管接头。对 15Cr1Mo 管接头进行试验目的是为了验证试验规范的正确性和可行性, 并对试验结果进行分析处理, 来检验各不同组合应力水平的失效机理是否一致, 试验方案及结果如表 1。在以上试验无误的条件下, 对经过实际运行的旧 12Cr1MoV 试件进行试验, 试验方案及结果如表 2, 目的是建立电站锅炉蛇形管摩擦焊接头残余寿命计算模型^[2]及接头的金相组织的变化情况。上述试验都是在哈锅材料研究所的内压爆破试验机上进行的。

4.2 试验数据的处理

对表 1 和表 2 的试验数据, 在不同的组合应力水平下, 在对数正态概率纸上, 可回归出不同的组合应力水平的分布直线。为说明问题, 图 1 给出了应力水平 5、6、7、8 的 15Cr1Mo 钢分布直线, 利用 Shapiro-Wilk^[6] 检验也可得到相同的结论。根据加速寿命试验的基本条件, 各不同应力水平下试件的失效机理应相同, 在对数正态概率纸上的分布直线应该是大致相互平行的, 即其标准差应大致相等。从图 1 的分布直线可看出这一结论。

表 1 15Cr1Mo 试验方案及试验数据

应力水平	1	2	3	4	5	6	7	8
温度 $T/^\circ\text{C}$	510	510	510	540	540	540	570	585
压力 P/MPa	240	310	335	310	200	240	200	140
	412.0	158.9	67.6	4.2	151.1	87.6	52.4	214.5
寿命 t/h	1 863.4	417.2	340.3	6.8	386.6	192.5	72.5	396.0
	5 248.0	1 406.0	722.5	29.1	854.0	338.0	95.0	526.3
	8 909.5	2 416.0	1 019.5	170.1	1 132.4	502.6	242.0	853.2

表 2 12Cr1MoV 试验方案及试验数据

应力水平	1	2	3	4	5	3
温度 $T/^\circ\text{C}$	540	540	570	600	630	570
压力 P/MPa	200	270	200	130	98	200
寿命 t/h	119.1	1.9	2.5	17.6	103.0	17.5
	201.7	3.8	3.3	25.2	156.7	29.7
	209.3	9.9	4.0	28.5	322.0	51.0
	340.4	12.3	12.4	81.5	372.0	167.0
				483.0		
			731.5			

对于本研究所采用的温度和应力双加速寿命试验, 为了对试验结果有一个更精确的描述, 采用了极大似然估计法进行分布参数和试验常数的估计。在每个组合应力水平 (T_i, σ_i) 下进行试验, 对于寿命分布为对数正态分析时, 其标准差 S 与应力水平无关, 由 Arrhenius 方程知当温度和应力都对寿命有影响时, 加速方程^[7] 为 $t = (A/\sigma^c)\exp(B/T)$, 可知对数均值 μ 与温度 T 和应力 σ 之间应满足 $\mu = A + B/T + c\ln\sigma$, 其中 A, B, c 都是试验常数。假定在每个组合应力 (T_i, σ_i) 下, 有 n_{ij} 个试件进行完全寿命试验, 试件的失效时间 $t_{(1)ij} \leq t_{(2)ij} \leq \dots \leq t_{(n_{ij})ij} (i = 1, 2, \dots, l_1; j = 1, 2, \dots, l_2)$, 用这些数据估计 σ, A, B, c , 可得用复合函数形式表示的似然函数^[7]

$$L = \prod_{i=1}^{l_1} \prod_{j=1}^{l_2} \left\{ \prod_{k=1}^{n_{ij}} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi S t(k)_{ij}}} \exp \left(-\frac{(\ln t(k)_{ij} - \mu_{ij})^2}{2S^2} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

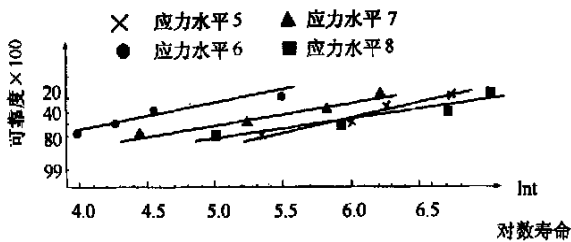


图 1 不同应力水平下的分布直线

其中: $\mu_{ij} = A + B/T_i + c\ln\sigma_j$, 对 L 取自然对数, 然后对 σ, A, B, c , 求偏导数, 并令各偏导数为零, 得到 5 个超越方程, 将表 1 的数据代入, 利用优化估计方法^[8] 可得到各参数的估计值。 $A = -33.726, B = 76247.631, c = -9.983, S = 1.147$ 将上述各参数的估计值代入式 $\mu = A + B/T + c\ln\sigma$ 中, 求得各组合应力水平的均值 μ_m 和相应的标准差 S_m, m 表示组合应力水平。 $\mu_1 = 8.937, \mu_2 = 6.382, \mu_3 = 5.607, \mu_4 = 2.788, \mu_5 = 7.164, \mu_6 = 5.343, \mu_7 = 3.826, \mu_8 = 5.805,$

$S_1 = 1.631, S_2 = 1.071, S_3 = 1.102, S_4 = 1.452, S_5 = 1.321, S_6 = 0.665, S_7 = 0.938, S_8 = 0.575.$

采用最大分散比的方法来检验失效机理是否相同, 由求得各标准差可知 $F_{\max} = S_{\max}^2/S_{\min}^2 = 8.036$, 小于文献[4] 提供的 $F_{\max}(0.01; 8, 4) = 87.2$, 由式 $P[F_{\max} \geq F_{\max}(\alpha; k, \nu)] = \alpha$ (4)

可认定 $S_i = 1.147 (i = 1, \dots, 8)$ 。从数学上又证明了各应力水平的失效机理是相同的。对表 2 所列已运行 132 kh 的 12Cr1MoV 接头试验数据进行同样处理, 也可得出上述类似结果。

5 结论

按照本文所提出的加速寿命试验规范, 对 15CrMo 和 12Cr1MoV 材料新旧两种摩擦焊接头试件进行了高温内压爆破试验, 通过对试验数据采用回归和最大分散比方法的分析处理, 证明了在不同组合应力水平下, 焊接接头试件的失效机理是一致的。说明本文所提出的加速寿命试验规范和温度、应力双加速试验方法是正确的, 并且切实可行, 可供在实验室中研究类似的高温高压部件持久强度和可靠性问题借鉴参考。

参考文献:

- [1] 江先美, 黄家相. 300 MW、600 MW 火电机组锅炉用钢补充试验及钢种系列化研究报告[R]. 上海: 上海发电设备成套设备研究所, 1990. 3—13.
- [2] 增山不二光. Application of non-destructive life assessment technique with quantifying structural degradation to aged power boiler[J]. 三菱重工技报, 1991, 20(1): 26—30.
- [3] 茆诗松. 金属材料加速寿命试验统计外推方法的研究报告[R]. 上海: 上海发电设备成套设备研究所, 1984. 6—12.
- [4] 山内二郎. Statistical tables and formulas with computer applications [J]. Journal of American Statistical Association, 1972, 67(4): 72—75.
- [5] 赵继俊, 邹经湘. 锅炉蛇形管摩擦焊接头残余寿命计算模型[J]. 焊接学报, 2001, 22(2): 35—38.
- [6] 贺国芳. 可靠性数据的收集与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. 164—169.
- [7] 戴树森. 可靠性试验及统计分析(下)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983. 487—501.
- [8] 赵继俊, 邹经湘. 可靠性试验数据混合威布尔分布的参数优化估计[J]. 农业机械学报, 2000, 31(5): 106—109.

(何静芳 编辑)

the method described above is highly effective in conducting the fuzzy quantitative treatment of fault sample modes of a regenerative heating device, dramatically improving the convergence of a neural network training and facilitating the fault diagnosis of the regenerative heating system. **Key words:** steam turbine unit, regenerative heating system, fault diagnosis, fuzzy treatment, radial base function network

电站锅炉蛇形管焊接接头加速寿命试验规范的研究 = **A Study of the Accelerated-life Test Specification for the Coil-tube Welded Joints of a Utility Boiler** [刊, 汉] / ZHAO Ji-jun, ZOU Jing-xiang (College of Astronautics under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), XU Shi-bin (Harbin Boiler Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 17 ~ 19

A test specification for the accelerated-life test of utility boiler coil-tube welded joints was developed for the study of the latter's reliability. On this basis high-temperature internal-pressure explosion endurance tests were conducted with regard to a huge amount of resistance welded 15CrMo and 12Cr1MoV steel tube joints. An analytical processing of the test results has demonstrated the consistency of the failure mechanism of the welded joints under various accelerated-life test conditions, testifying at the same time to the validity of the test specification. **Key words:** accelerated-life test, test specification, welded joint, reliability

大型电站锅炉燃烧器区向火侧剪切大涡的尺度及其旋转速度 = **Scale and Rotating Velocity of a Big Shear Vortex at the Fire-facing Side of a Burner Region in a Large-sized Utility Boiler** [刊, 汉] / DIAO Yong-fa, HE Bo-shu (National Key Laboratory of Coal Clean Combustion under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), XU Jin-yuan (Energy and Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 20 ~ 22, 26

Measurements were taken of the vorticity field in the burner region of a HG-2008-YM2 type tangentially fired pulverized-coal boiler, which is considered as having a universal significance. The above measurements were conducted by employing a IFA300 constant-temperature hot wire anemometer with the use for the first time of a six-sensor hot-wire probe and its locating coordinate system. The big shear vortex at the fire-facing side of the tangentially fired burner jets is described by the use of a Rankine composite vortex. The scale and rotating velocity of the big shear vortex has been determined by a cold model test. The vortex core radius of the big shear is 25mm, and the rotating angular velocity of an in-furnace fluid tiny ball rotating as a rigid body, -1.56×10^5 r/min. The influence of the big shear vortex on pulverized-coal ignition and the NO_x nascent state in the relevant structure of the burner zone vortex was also analyzed. **Key words:** tangentially fired furnace, burner zone, big shear vortex, scale, rotating velocity, six-sensor hot-wire probe

超临界直流锅炉长期动态特性的建模与仿真 = **Modeling and Simulation of the Long-term Dynamic Characteristics of a Supercritical Once-through Boiler** [刊, 汉] / LI Yun-ze, YANG Xian-yong (Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 23 ~ 26

The long-term dynamic characteristics of a supercritical once-through boiler play a key role in the simulation and design of the control system of a supercritical once-through boiler and turbogenerator unit. To conduct a rapid, comprehensive and reliable study of the long-term dynamic characteristics of a supercritical once-through boiler in the process of peak-shaving and load changes, a simplified mathematical model has been set up for the economizer, water wall, superheater and reheater of a supercritical once-through boiler. The model building has been carried out on the basis of a rational mechanism analysis and model simplification and through the use of a state-space method. A group of fairly concise and innovative nonlinear relations for the pressure and flow rate changes at the working medium side have been derived. Finally, with the help of the above-mentioned simplified state-space model and nonlinear relations a simulation study was conducted of the long-term dynamic characteristics of a 600MW supercritical once-through boiler. The simulation results were found to be accurate. The present study has provided a very simplified and convenient mathematical model and method for