

文章编号: 1007-2683(2003)01-0062-05

基于加速寿命试验的摩擦焊接头可靠性研究

于艳秋¹, 赵继俊¹, 徐世斌²

(1. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨锅炉制造有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 研究制定了双应力的电站锅炉蛇形管焊接接头的加速寿命试验规范, 在此规范基础上, 对大量的 15CrMo 和 12Cr1MoV 两种材料的摩擦焊接头进行了高温内压爆破持久强度试验. 通过对试验结果的统计和分析, 证明了各组合应力水平失效机理的一致性, 并且得到了摩擦焊接头可靠度的计算模型.

关键词: 摩擦焊接头; 可靠度; 加速寿命试验; 失效机理

中图分类号: TG42 **文献标识码:** A

Reliability of the Friction Welded Joints in Boiler Serpentine Pipe Based on Accelerated Life Test

YU Yan-qiu¹, ZHAO Ji-jun¹, XU Shi-bin²

(1. Mechanical & Power Engineering, Harbin Univ. Sci. Tech., Harbin 150080, China;

2. Harbin Boiler Co. Ltd, Harbin 150040, China)

Abstract: In this paper, a specification of multiple stresses accelerated life test for friction welded joints in boiler serpentine pipe was worked out. Based on the specification, high-temperature internal pressure burst duration test was done for a large number friction welded joints of 15CrMo and 12Cr1MoV steel. Through calculation and analysis of the test results, the concordance of the failure mechanism on the different combined stress levels were verified and the reliability mathematical model for friction welded joints was set up.

Key words: friction welded joints; reliability; accelerated life test; failure mechanism

随着科学技术的发展, 高质量、高可靠度、长寿命的产品愈来愈多. 在实验室中, 按正常使用工况下进行寿命试验, 从经济上和时间上考虑, 往往是不可能的. 因此, 加速寿命试验方法被广泛地采用. 加速寿命试验的目的, 是用加大工作“应力”的方法, 加快产品失效, 从而缩短试验时间, 以便在较短的时间内估计出产品在正常的“应力”条件下的可靠性特征.

电站设备的众多零部件是在高温、高压下工作的, 经过长时间运行后, 这些零部件将产生蠕变, 最终发生持久断裂破坏. 为保证电站设备的安全运行, 钢或高温合金钢的热强性能数据, 不仅是电站锅炉设计中必不可少的, 也是研究锅炉零部件的可靠性问题和残余寿命预测的重要依据. 本文在试验的基础上, 对摩擦焊接头的可靠性进行了统计分析.

收稿日期: 2002-05-10

基金项目: 原机械工业部技术发展基金资助 (90J50801)

作者简介: 于艳秋 (1963-), 女, 哈尔滨理工大学副研究员.

1 恒定应力加速模型的选取

加速寿命试验的基本思想是利用高应力水平下的寿命特征去外推正常应力水平下的寿命特征. 实现这个基本思想的关键在于建立寿命特征与应力水平之间的关系, 又称加速模型, 通过此模型才能实现外推的目的. 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. 对恒定应力加速寿命试验, 当以温度作为加速应力时, 加速模型一般选用 Arrhenius 或单应力的 Eyring 规律. 当以电压或压力为加速应力时, 加速模型一般选用 Inverse power 规律. 当以温度和电压或压力同时作为加速应力时, 加速模型一般选用广义的 Eyring^[1~9] 规律.

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持久破坏都有加速作用. 因此, 这里所指的应力既包括压力又包括温度, 所作的持久强度试验是以压力和温度双应力的加速寿命试验. 故选用的加速模型为广义的 Eyring 规律

$$t = \frac{A}{S^C} \exp(B/T) \quad (1)$$

式中: S , T 分别为由压力折算的应力和试验绝对温度; A , B , C 为由试验确定的常数.

2 加速寿命试验规范

试验规范即在试验过程中应遵循的原则, 象本文所作的大批量、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.

2.1 应力范围确定

试验的最低应力的确定: 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, 必须尽量靠近预计的外推值或使用值, 这样可提高外推的精确程度.

试验的最高应力的确定: 最高的应力水平应尽量选得大一些, 但应注意不能改变试件失效机理, 特别不能超过产品允许的极限应力. 根据专业经验, 把预计的承载寿命和温度结合起来, 综合考虑后确定, 也可以先作一些初步试验和分析后再确定.

2.2 温度范围确定

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[2, 12]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 $50 \sim 70^\circ\text{C}$ 为宜, 最终还应考虑到压力的影响. 最低试验温度应接近或等于最低使用温度.

2.3 应力分档方法

对于持久强度参数法外推, 根据外推公式中系数的个数, 应力以不低于 4 挡为宜. 因为应力和承载寿命间呈递幂率关系, 所以当最低应力 S_1 和最高应力 S_k 确定后, 其它档次的应力 $S_i (i=2, 3, \dots, k-1)$ 应按下式来确定

$$\ln S_i = \ln S_1 + (i-1) \frac{(\ln S_k - \ln S_1)}{k-1} \quad (2)$$

2.4 温度分档方法

与应力分档理由相同, 以不低于 4 挡为宜, 并考虑试验机的控温准确度. 当最低和最高试验温度 T_1 和 T_k 确定后, 其它档次的温度 $T_i (i=2, 3, \dots, k-1)$ 应按下式来确定

$$\frac{1}{T_i} = \left\{ \frac{1}{T_1} - (i-1) \left[\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_k} \right) / (k-1) \right] \right\} \quad (3)$$

2.5 试样的投入数

因为同温度同应力下, 若一组试样的寿命分布已知, 试样数可适当减少. 但为了求出承载寿命 t 的对数标准差 σ , 每组试样不应少于 4~5 个, 每一应力水平下, 试样数可以相等, 也可以不等. 为了能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样.

3 试验方案的制定

本研究所用试样分为两种, 一种是由哈尔滨锅炉制造有限责任公司专为试验而制的新的 15CrMo, 管的外直径为 42mm, 壁厚为 5mm 摩擦焊管接头; 另一种是取自大庆新华发电厂运行温度为 540°C 、管内介质压力为 $1.013 \times 10^7 \text{Pa}$, 已运行了 $13.2 \times 10^4 \text{h}$ 的 12Cr1MoV, 管的外直径为 42mm, 管壁厚度为 5mm 的过热器摩擦焊管接头. 对新的 15CrMo 管接头进行试验, 其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下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. 上述试验都是在哈尔滨锅炉厂材料

研究所的内压爆破试验机上进行的。

表1 15CrMo 摩擦焊接头内压爆破持久强度试验方案
及试验结果

应力水平	温度 $\theta/^\circ\text{C}$	折算应力 P/MPa	寿 命 t/h			
1	510	240	412.0	1863.4	5248.0	8909.5
2	510	310	158.9	417.2	1406.0	2416.0
3	510	335	67.6	340.3	722.5	1019.5
4	540	310	4.2	6.8	29.1	170.1
5	540	200	151.1	386.6	854.0	1132.4
6	540	240	87.6	192.5	338.0	502.6
7	570	200	52.4	72.5	95.0	242.0
8	585	140	214.5	396.0	526.3	853.2

表2 12Cr1MoV 摩擦焊接头内压爆破持久强度试验方案
及试验结果

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

4 试验结果的统计检验

4.1 分布规律的假设检验

根据现有的研究结论, 15CrMo 和 12Cr1MoV 两种材料的高温持久寿命服从对数正态分布^[7,8], 利用 Shapiro-Wilk 的 W 检验^[9]也可得到相同的结论。W 检验过程如下。

取原假设 H_0 : 样本 $x_{k,i} = \ln(t_{k,i})$ 来自正态分布母体, 其中 k 为应力水平, $k=1, \dots, 8$; i 为序数, $i=1, \dots, 4$ 。检验统计量为

$$W_k = \frac{\left[\sum_{i=1}^{[n/2]} a_i (x_{k,n+1-i} - x_{k,i}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (x_{k,i} - \bar{x}_k)^2} \quad (4)$$

其中: $\bar{x}_k$ 为应力水平 k 的样本均值; a_i 是统计量的系数。当 $n=4$ 时, W 统计量为

$$W_k = \frac{0.6872(x_{k,4} - x_{k,1}) + 0.1677(x_{k,3} - x_{k,2})}{\sum_{i=1}^4 (x_{k,i} - \bar{x}_k)^2} \quad (5)$$

当 $W_k > W_\alpha$ 时接受原假设 H_0 , 认为 $t_{k,i}$ 来自对数正态分布母体; 反之, 拒绝 W_α 为 W 显著性水平为 α 的分位数。当 $\alpha=0.1$, $W_{0.1}=0.792$ 。

将表1中各应力水平的数据代入式(5), 得到 $W_1=0.949$, $W_2=0.885$, $W_3=0.907$, $W_4=0.933$, $W_5=0.929$, $W_6=0.973$, $W_7=0.925$, $W_8=0.995$ 。可见 $W_k > W_{0.1}$ ($k=1, \dots, 8$), 即可认为表1中的各应力水平中的试验数据均服从对数正态分布。

4.2 对数方差 σ_k^2 的相等性检验

对表1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, 图1a, 图1b为不同应力水平15CrMo钢分布直线。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, 因此在对数正态概率纸上的分布直线大致应该是相互平行的, 即其方差或标准差应基本相等。从图1所作的分布直线可看出这一结论。

在统计理论上, 各应力水平的方差是否相等, 可用 Bartlett 检验^[10]和 Hartley 提出的最大分散比 $\sigma_{j\max}^2 / \sigma_{j\min}^2$ 来检验^[11]。

Bartlett 检验, 取原假设 $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2$, 计算统计量

$$\hat{\chi}^2 = \frac{1}{c} \left[2.3026 \left(\gamma \log \sigma^2 - \sum_{j=1}^k \gamma_j \log \sigma_j^2 \right) \right] \quad (6)$$

式中: $c = \frac{\sum_{j=1}^k \frac{1}{\gamma_j} - \frac{1}{\gamma}}{3(k-1)} + 1$, $\gamma = n - k = \sum_{j=1}^k \gamma_j$ 总体自

由度, $\sigma^2 = \frac{\sum_{j=1}^k \gamma_j \sigma_j^2}{\gamma}$ 公共方差。如果 $\hat{\chi}^2 > \hat{\chi}_\alpha^2(k-1)$, 拒绝原假设 H_0 , 否则, 接受原假设。 $\hat{\chi}_\alpha^2(k-1)$ 为自由度 $(k-1)$ 的 $\hat{\chi}^2$ 分布, 显著性水平为 α 的分位数。当 $\alpha=0.1$, $k=8$ 时, $\hat{\chi}_{0.1}^2(7)=12.17$ 。对表1数据计算中间结果如表3。将表3的各数据代入式(6)中, 求得 $\hat{\chi}^2=4.959 < 12.019$, 接受原假设, 即认为各应力水平试验数据的对数方差相等。

最大分散比检验, 按下式计算统计量 $\hat{F}_{\max} = \sigma_{j\max}^2 / \sigma_{j\min}^2$, 如果满足下式

$$P[\hat{F}_{\max} > F_{\max}(\alpha; k, \gamma_0)] = \alpha \quad (7)$$

则拒绝方差相等性假设, 反之接受假设, 其中 $\gamma_0=3$ 表示各应力水平的自由度相等, 由文[11]查得

$F_{\max}(0.05, 8, 3)=83.5$ $\hat{F}_{\max}=2.079/0.249=8.349$ 显然不满足式(7), 即接受各应力水平相等性假设。

从以上的各种检验方法得知, 正常工作状态下

表3 Bartlett 检验中间计算结果

应力水平	σ_j^2	$\gamma_j = n_j - 1$	$\gamma_j \sigma_j^2$	$\log \sigma_j^2$	$\gamma_j \log \sigma_j^2$
1	1.371	3	4.113	0.137	0.411
2	1.214	3	3.642	0.084	0.252
3	1.092	3	3.276	0.038	0.114
4	2.079	3	6.239	0.318	0.954
5	0.619	3	1.858	-0.208	-0.624
6	0.433	3	1.299	-0.364	-1.091
7	0.325	3	0.975	-0.488	-1.464
8	0.249	3	0.748	-0.604	-1.812
Σ		24	22.148		-3.26

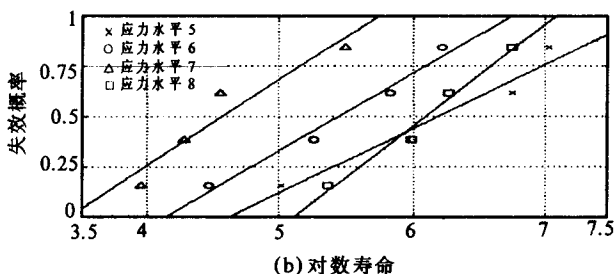
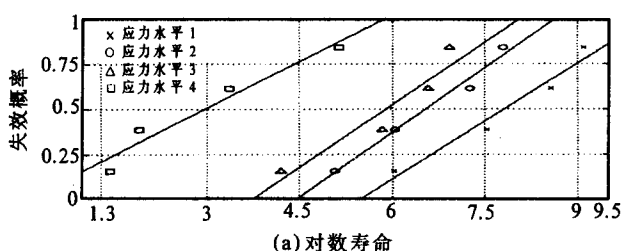


图1 不同应力水平下的分布直线

差的估计值 $\hat{\sigma}_0^2$ 与各加速工况的方差应相等,说明正常工况的失效机理与加速工况一致,取各应力水平方差的加权平均

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{n_1 \sigma_1^2 + n_2 \sigma_2^2 + \cdots + n_k \sigma_k^2}{n} \quad (8)$$

由上式计算得到 $\hat{\sigma}_0^2 = 0.923$.

4.3 试验常数的极大似然估计

对于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,采用了极大似然函数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, S_j) 下进行试验,对于寿命分布为两参数的对数正态分布时,其方差 $\hat{\sigma}^2$ 与应力水平无关,由式(1)可知对数均值 μ 与温度 T 和应力 S 之间应满足^[13]

$$\mu = A + B/T + C \ln S \quad (9)$$

式中 A, B, C 都是试验常数.假定在每个组合应力 (T_i, S_j) 下,有 n_{ij} 个试件进行完全寿命试验,试件的失效时间为 $t_{(1)ij} \leq t_{(2)ij} \leq \cdots \leq t_{(n_{ij})ij} (i=1, 2, \cdots, l_1; j=$

$1, 2, \cdots, l_2)$,用这些数据估计 A, B, C ,可得到用复合函数形式表示的似然函数为^[12]

$$L = \prod_{i=1}^{l_1} \prod_{j=1}^{l_2} \left\{ n_{ij}! \prod_{k=1}^{n_{ij}} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_0} \exp \left[-\frac{(\ln t_{(k)ij} - \mu_{ij})^2}{2\sigma_0^2} \right] \right] \right\} \quad (10)$$

其中, $\mu_{ij} = A + B/T_i + C \ln S_j$. 对似然函数 L 取自然对数,然后对 A, B, C 求偏导数,并令各偏导数为零,得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \ln L}{\partial A} &= \sum_{i=1}^{l_1} \sum_{j=1}^{l_2} \left[\frac{1}{\sigma_0^2} \sum_{k=1}^{n_{ij}} (\ln t_{(k)ij} - \mu_{ij}) \right] = 0 \\ \frac{\partial \ln L}{\partial B} &= \sum_{i=1}^{l_1} \sum_{j=1}^{l_2} \frac{1}{T_i} \left[\sum_{k=1}^{n_{ij}} \frac{(\ln t_{(k)ij} - \mu_{ij})}{\sigma_0^2} \right] = 0 \\ \frac{\partial \ln L}{\partial C} &= \sum_{i=1}^{l_1} \sum_{j=1}^{l_2} \ln V_j \left[\sum_{k=1}^{n_{ij}} \frac{\ln t_{(k)ij} - \mu_{ij}}{\sigma_0^2} \right] = 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将表1的数据代入上式,利用数值计算可求得各参数的估计值^[14]. $\hat{A} = -33.726$, $\hat{B} = 76247.631$, $\hat{C} = -9.983$ 将上述各参数的估计值代入式(9)中,求得各组合应力水平的均值 μ_m , m 表示组合应力水平. $\mu_1 = 8.937$, $\mu_2 = 6.382$, $\mu_3 = 5.607$, $\mu_4 = 2.788$, $\mu_5 = 7.164$, $\mu_6 = 5.343$, $\mu_7 = 3.826$, $\mu_8 = 5.805$.

假定 15CrMo 钢锅炉用管的正常运行温度为 510℃,管内介质压力为 $1.013 \times 10^7 \text{ Pa}$,按公式 $S = [(1 + \beta)P]/[2(\beta - 1)]$ ^[12] 可求出折算应力为 36.26MPa,利用以上所求的各数据和式(9)求出正常运行工况下的对数寿命均值 $\mu = 27.806$.因为已知持久强度寿命服从对数正态分布,其可靠度与寿命间函数关系为

$$R(Z_R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_t^\infty e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma_0^2}} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-Z_R}^\infty e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (12)$$

式中 $Z_R = (\ln t - \mu)/\sigma_0$ 为与一定的可靠度相对应的标准参量,通过变形得到可靠寿命为

$$t_R = \exp(\mu + Z_R \sigma_0) \quad (13)$$

把 15CrMo 在正常运行工况下的均值、标准差以及不同可靠度所对应的 Z_R 值代入式(13),可得到新 15CrMo 摩擦焊接头的可靠寿命为 $t_{0.9} = 2.737 \times 10^{11}$, $t_{0.95} = 1.805 \times 10^{11}$, $t_{0.99} = 8.266 \times 10^{10}$, $t_{0.999} = 2.968 \times 10^{10}$.同理,对表2中运行过 $13.2 \times 10^4 \text{ h}$ 的 12Cr1MoV 过热器的摩擦焊接头试验数据进行计算,各参数的估计值为 $\hat{A} = 0.0284$, $\hat{B} = 31547.317$, $\hat{C} = -6.516$, $\hat{\sigma} = 1.215$.这种试件的正常工作温度是 540℃,管内介质压力为 $1.013 \times 10^7 \text{ Pa}$,可求出正常运行工况下的对数均值为 $\mu = 15.435$,利用式(13)计算出经过长时间氧化和磨损作用的 12Cr1MoV 摩擦焊管接头的残余寿命为 $t_{0.9} = 1.064 \times 10^6$, $t_{0.95} = 6.844 \times 10^5$, $t_{0.99} = 2.992 \times$

10^5 , $t_{0.999} = 1.011 \times 10^5$.

5 结 语

通过对 15CrMo 和 12Cr1MoV 两种材料新旧两种摩擦焊管接头试件的加速寿命试验,以及对试验数据的分析处理,可得出如下结论:本文所提出的加速寿命试验规范和温度、应力双加速试验的方法是

合理的,并且也是切实可行的.长时间的高温氧化和表面磨损作用,对残余寿命的影响是明显的.所以,在上述对 12Cr1MoV 已运行 13.2×10^4 h 的试件的折算应力计算中,应考虑氧化层与磨损对折算应力的影响,其残余寿命应比计算结果有所降低.综合上述试验及理论分析计算的结果,摩擦焊焊接接头在设计寿命周期内是可靠的.

参考文献:

- [1] 茆诗松,王玲玲.加速寿命试验[M].北京:科学出版社,1997.
- [2] 戴树森等.可靠性试验及统计分析(下)[M].北京:国防工业出版社,1983.
- [3] HIDEO Hirose, et al. Estimation of Threshold Stress in Accelerated Life-Testing[J]. IEEE Trans Reliability, 1993, 42(4): 650-657.
- [4] KWEE-POO Yeo, et al. Planning Step-Stress Life-Test with a Target Acceleration-Factor[J]. IEEE Trans Reliability, 1999, 48(1):61-67.
- [5] JYH-JEN Horng Shiau. Analying Accelerated Degradation Data By Nonparametric Regression[J]. IEEE Trans Reliability, 1999, 48(2):149-158.
- [6] TSENG Sheng-Tsaing TSENG, et al. Comparison of Type-I & Type-II Accelerated Life Test for Selecting the Most Reliable Product[J]. IEEE Trans Reliability, 1994, 43(3):503-511.
- [7] 茆诗松等.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.
- [8] 江先美等.300MW, 600MW 火电机组锅炉用钢补充试验及钢种系列化研究报告[R].上海发电设备成套设备研究所,1990. 3-13.
- [9] 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.
- [10] SACH Lothar. Applied Statistics A Handbook of Techniques[M]. New York:Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1984.
- [11] [日]山内二郎. Statistical Tables and Formulas with Computer Applications[J]. Journal of American Statistical Association, 1972, 67(4): 72-75.
- [12] 杨杰章.材料与设计[M].北京:机械工业出版社,1990. 291-302.
- [13] 武汉工学院,吉林工业大学.汽车可靠性设计[M].北京:机械工业出版社,1988.149-156.
- [14] 赵继俊,张锡清.可靠性试验数据的最优化参数估计[J].兵工学报,1997, 20(2):135-138.

(审稿:周真教授;林尚扬教授;编辑:张雪冰)