

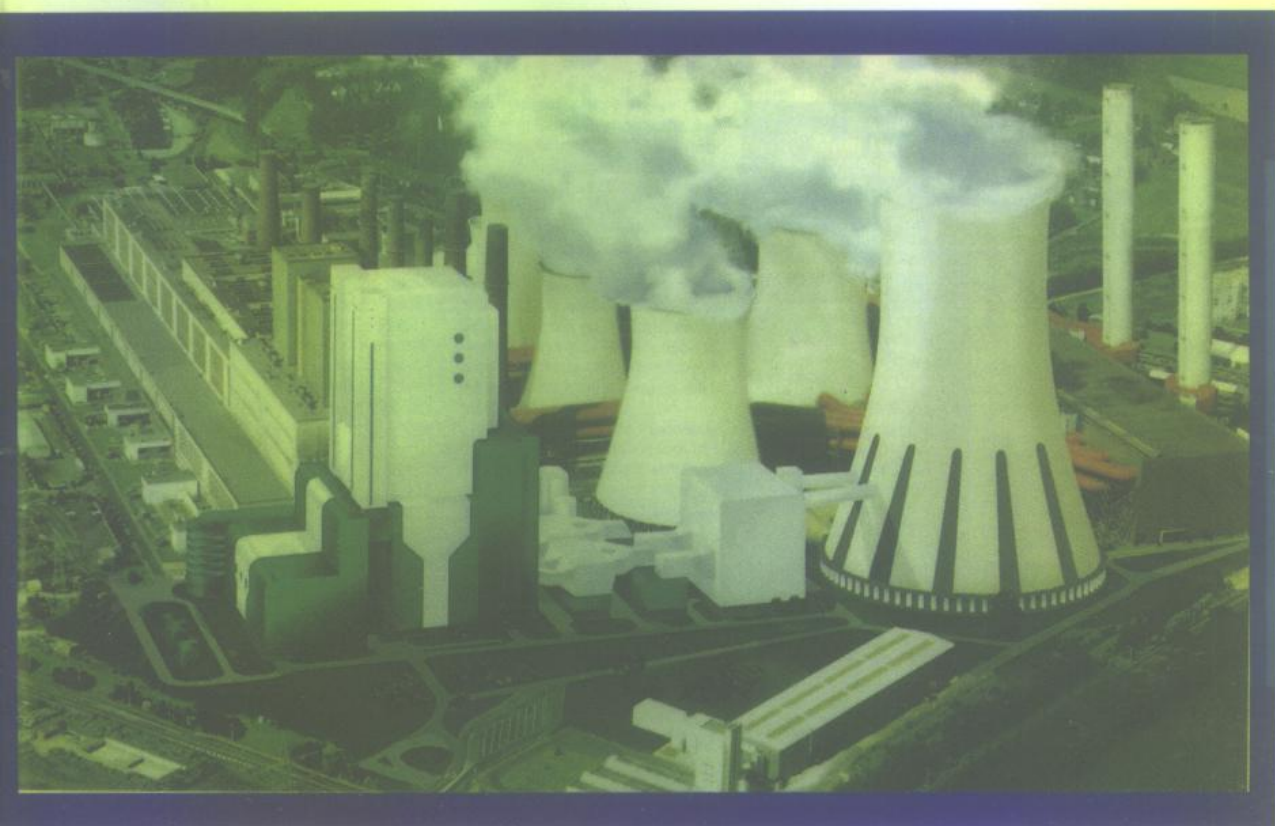
HUO DIAN CHANG GUAN JIAN BU JIAN SHI XIAO FEN XI JI QUAN GUO CHENG SHOU MING GUAN LI LUN WEN JI

火电厂关键部件

失效分析及全过程寿命管理

论文集

国家电力公司热工研究院材料研究所



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

M621-53

455503

G91

火电厂关键部件 失效分析及全过程寿命管理 论文集

国家电力公司热工研究院材料研究所



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书共汇集了有关火电厂金属监督方面的论文 26 篇,按内容分寿命管理、失效分析、检测与修复技术三个部分。所辑论文的内容侧重于火电厂关键部件——主汽管、锅炉汽包、高温锅炉管、汽轮机主轴、叶片、发电机护环等,适合于从事火电厂金属工作的技术人员阅读,可做为电厂承压部件事故分析、寻求延寿方案、寿命评估的参考书,对提高无损检测技能也具有一定指导意义。

图书在版编目(CIP)数据

火电厂关键部件失效分析及全过程寿命管理论文集/
国家电力公司热工研究院材料研究所编. - 北京: 中国
电力出版社, 1999.10

ISBN 7-5083-0183-8

I. 火… II. 国… III. ①火电厂-设备-失效分析
-文集 ②火电厂-设备-检修-文集 IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 63734 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2000 年 2 月第一版 2000 年 2 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 357 千字
印数 0001—1000 册 定价 26.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前言

通常将火电厂关键部件的现场检测(含在线检测)、失效分析、寿命管理以及带缺陷(或损伤)部件的修复技术等归于电厂金属监督的专业工作范围,而金属监督工作的目的主要是为了保证机组的安全、经济运行。从电厂金属监督工作的内容看,它不仅具有丰富的专业内涵,而且还包含着科学管理方面的内容。

自 50 年代我国第一台高温高压火电机组正式投产、从而派生出电站金属监督工作以来,已经经历了近 50 年的发展历程。期间,随着材料科学、断裂力学、信息技术、电子技术以及测试技术的发展,尤其是测试仪器设备的不断创新、先进的数据采集技术及智能化仪表的逐渐被采用、电厂运行检测中计算机技术的广泛推广和应用,极大地充实和丰富了我们的认知能力。国家电力公司热工研究院材料研究所作为原电力部直属的主要从事火电厂金属监督技术方法、标准与诊断设备的研究开发单位,通过长期的试验研究,从现场实际的运行检测中积累了许多宝贵的经验。例如,在温度、应力及相应环境条件下金属的组织、结构、性能变化以及部件的正常、非正常损坏等方面,通过各自可涉及的试验研究工作,总结出了一些规律性的东西。为了及时交流、提供有关这方面的最新试验研究动态,我们组织编辑了这本论文集。

本论文集共分三个部分。其中:“寿命管理”部分共计编入了 9 篇论文,重点介绍主蒸汽管道、汽包等的寿命评估新方法,有关寿命损耗、部件损伤、老化的机制,部件的运行状态、受力分析以及管道支吊架调整等方面的试验研究工作;“失效分析”部分共计收录了 8 篇论文,汇集了几个重大部件的失效分析实例,重点介绍部件的失效机理、分析方法以及防范对策等;“检测与修复技术”部分共计收录了 9 篇论文,重点介绍适用于现场的检测技术、检测方法以及修复技术等。

火电厂的首要问题是可靠性问题,即将推行的以可靠性为中心的维修项目,其主要的识别程序将取决于关键部件的主要的、重要的失效类型,由此确定优先的维修顺序。对于如何实现火电厂运行和维修的优化,这将是今后一个时期广大火电厂金属监督工作者所普遍应该关注的问题。在着手进行这些工作时,首先必须要对火电厂关键部件实施状态检测,在对部件实施状态检测的基础上,对这些部件的状态作出评估。当部件出现裂纹、损伤或组织、结构发生变化和性能下降时,可通过部件状态评估来帮助决定该部件是继续运行、进行检修或更换。当然,在作出这些决策前,还要根据未来机组的运行情况(即部件所需承受的服役条件)来评估其剩余寿命以及必要的监测方法。

显而易见,上述收录的论文将会给开展这方面的试验研究工作带来一定的裨益。尽管这些论文的内容主要是针对火电厂关键部件的,但由于其研究对象的普遍性以及试验研究内容的广泛性,因此对其他行业从事相关领域研究的人员也具有一定的参考价值。

吴诚德

编者 束国刚

范长信

1998.10.8 于西安



前 言

寿 命 管 理

娘子关发电厂 10CrMo910 钢薄壁主汽管 θ 法寿命

- 评估及其应用研究..... 束国刚 等 (3)
- 附: θ 法应用研究 (14)
- 热强钢蠕变开裂和裂纹扩展的断裂力学研究 李自力 (17)
- 蠕变损伤对发电设备用低合金热强钢力学和断裂
力学性能的影响 李自力 (24)
- 电厂高压锅炉汽包钢的疲劳性能及其疲劳设计曲线..... 王金瑞 等 (34)
- 某电厂 670 t/h 锅炉汽包的低周疲劳寿命研究 李益民 等 (50)
- 12Cr1MoV 钢在保载条件下的疲劳蠕变交互作用
断裂特征图 束国刚 (61)
- 高温锅炉管的材料老化与寿命评估 李耀君 (69)
- 应力测量技术及在电站构件应力分析中的应用..... 康豫军 等 (95)
- 电站汽水管道及支吊架运行状态分析与对策..... 杨百勋 等 (105)

失 效 分 析

常熟电厂 2 号机高压导汽管弯头焊缝开裂原因

- 分析及其对策..... 束国刚 等 (119)
- 高温腐蚀对 102 钢的作用..... 束国刚 等 (129)
- 汽轮发电机组断轴原因和预防 陈吉刚 (135)
- 电厂高温管道弯头失效..... 赵彦芬 等 (147)
- 导汽管弯管的应力分析及蠕变寿命计算..... 梁昌乾 等 (154)
- 护环钢的应力腐蚀研究..... 杨百勋 等 (159)
- 发电机护环钢的腐蚀疲劳行为研究..... 梁昌乾 等 (172)
- 奥氏体钢锅炉管的晶界应力腐蚀断裂和防止措施..... 陈吉刚 等 (181)

检 测 与 修 复 技 术

- 汽轮机末级叶片水蚀后的焊接修复..... 范长信 等 (189)
- 汽轮机末级叶片 TIG 堆焊防水蚀试验研究 范长信 等 (198)
- 超声成像技术在电力工业中的应用 陈秉忠 (204)
- 电站锅炉过热器及再热器管壁金属层厚度和内壁
氧化层厚度超声测量 马剑民 (209)

300MW、600MW 铸锻件转子中心孔自动检测装置研制	吴前驱 等 (213)
在役发电机护环的超声探伤方法和接触聚焦换能器研究	吴前驱 (217)
发电厂汽轮机叶片叶根超声波检验	吴前驱 等 (225)
电力工业中的红外成像检测技术	侯年仓 等 (231)
在役铁磁性材料涡流探伤方法研讨	孙建国 等 (239)

寿

命

管

理

娘子关发电厂 10CrMo910 钢薄壁主汽管 θ 法寿命评估及其应用研究

束国刚 李益民 梁昌乾 赵彦青

【摘要】 本文从实验、理论及应用三方面研究了 θ 法修正方程在 10CrMo910 钢蠕变寿命评估中的应用。实验结果表明：用 θ 法修正方程对 10CrMo910 钢蠕变断裂性能数据进行处理效果较好；热力学理论研究阐述了 θ 法修正方程中三参数与应力及激活能的关系，指出可用短时高应力下的蠕变试验数据来确定低应力下的长期蠕变曲线；进一步运用该方法对娘子关发电厂主汽管道的剩余寿命进行评估，实践证明其结果与传统法结果及管道实际蠕胀状况相吻合。此外，通过该方法还可描述管道在实际运行状态下的变形量与时间的关系曲线，从而为管道蠕胀测量工作提供了理论依据。

【关键词】 θ 法 蠕变 寿命评估 10CrMo910 钢

1. 引言

蠕变寿命对高温部件的设计极其重要，对于火力发电厂使用的低合金耐热钢高温部件，直接通过试验获取其在 10 万 h、甚至 20 万 h 下的持久强度数据是极为困难的，一般采用提高应力和温度的方法得到短时区的断裂时间与应力、温度之间的关系，再推出长时区断裂时间与应力、温度之间的关系，这就是所谓的寿命外推。

寿命外推方法的发展可简略认为经历了四个阶段。在第一阶段中，主要采用双变量外推（如等温线法），以线性外推为主要依据；第二阶段则侧重研究蠕变过程中的断裂机理与组织变化，提出寿命的评估应建立在相适应的断裂模式基础上；到了 50 年代，参数外推法逐渐形成，外推研究进入第三阶段，Larson-Miller 公式就是参数外推公式中最著名的一个，它把时间、温度表示成一互相补偿的参数，将 $\log \sigma - \log \tau$ 图上的一组等温线通过适当的坐标变换，移到同一根曲线上，这条曲线称综合曲线，横坐标是时间与温度的组合函数，称时间-温度参数，参数公式中常数的确定方法近年已有发展，通过统计（回归分析）由全部试验点综合起来确定其最佳值的方法，取代了原来方法；第四个发展阶段实际上是第三阶段的进一步丰富和发展，Van Loewer 提出了应力-时间-温度参数概念，认为时间-温度-应力之间存在唯一的函数关系，即

$$f(\sigma, \tau, T) = \text{常数}$$

说明：参加本文工作的还有 北 京 科 技 大 学 陈国良、杨王玥、郭 宏，
山西省电力试验研究所 孔慧霞、邱树德、李乃寒、李 青，
娘 子 关 发 电 厂 张爱锁、李明珠、王新民。

这就开创了外推中的解析法，它可以把前面提到的双变量法、各种参数法统一成一体，计算机的应用使其成为可能。

θ 法从概念上讲应归纳在第四阶段。Larson - Miller 方法虽使用方便，但由于它不考虑蠕变的具体过程，因而其外推精度不高。近年来，一种以恒应力蠕变试验为基础的新型寿命外推方法—— θ 法，已得到越来越广泛的应用。该方法的优点是精度高、外推时间长（3 个月试验外推 30 年），分析中比 Larson - Miller 方法涉及到了更多的过程因素。

设蠕变过程满足以下方程

$$\epsilon_c = \epsilon_t - \epsilon_0 = \Phi_1(1 - e^{-\Phi_2 t}) + \Phi_3 t + \Phi_4 e^{(t-t_\tau)\Phi_5} \quad (1)$$

式中 ϵ_c ——蠕变应变；

ϵ_t ——总应变；

ϵ_0 ——弹性应变；

Φ_i ——参数 ($i = 1 \sim 5$)；

t_τ ——蠕变第二阶段开始的时刻。

显然方程 (1) 的右边三项分别代表蠕变的三阶段，而 Φ_3 相当于第二阶段蠕变速率。

在上述分析基础上，Evans 和 Wilshire 视蠕变过程三阶段为一连续变化曲线，省略去第二项，提出下述 θ 方程式

$$\epsilon_c = \epsilon_t - \epsilon_0 = \theta_1(1 - e^{-\theta_2 t}) + \theta_3(e^{\theta_4 t} - 1) \quad (2)$$

式中 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 ——参数。

2. θ 法概念及其物理意义

2.1 θ 方程与蠕变变形曲线

θ 方程式为

$$\epsilon = \theta_1(1 - e^{-\theta_2 t}) + \theta_3(e^{\theta_4 t} - 1)$$

可把上式分解为两部分

即

$$\epsilon = \epsilon_p + \epsilon_t$$

$$\epsilon_p = \theta_1(1 - e^{-\theta_2 t})$$

$$\epsilon_t = \theta_3(e^{\theta_4 t} - 1)$$

对于

$$\epsilon_p = \theta_1(1 - e^{-\theta_2 t})$$

则

$$\epsilon_p = \theta_1 - \theta_1 e^{-\theta_2 t}$$

$$\theta_1 - \epsilon_p = \theta_1 e^{-\theta_2 t}$$

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{d\epsilon_p}{dt} = \theta_1 \theta_2 e^{-\theta_2 t}$$

$$= \theta_2(\theta_1 - \epsilon_p) \quad (3)$$

由公式的两边可知： θ_1 是与 ϵ_p (变形) 相关的参数， θ_2 则为初始阶段蠕变速率参数。公式 (3) 表明： $\dot{\epsilon}_p$ 随变形量 ϵ_p 的增加而线性降低，见图 1，也即上式描述了蠕变由 I 阶段向 II 阶段的变化过程。

对于

$$\epsilon_t = \theta_3(e^{\theta_4 t} - 1)$$

$$\epsilon_t = \theta_3 e^{\theta_4 t} - \theta_3 \Rightarrow \theta_3 e^{\theta_4 t} = \epsilon_t + \theta_3$$

$$\dot{\epsilon}_t = \frac{d\epsilon_t}{dt} = \theta_3 \theta_4 e^{\theta_4 t}$$

即

$$\dot{\epsilon}_t = \theta_4(\theta_3 + \epsilon_t) \quad (4)$$

由式 (4) 知： θ_3 是与变形量 ϵ_t 相关的参数， θ_4 是蠕变加速阶段速率参数。公式表明： $\dot{\epsilon}_t$ 随变形量 ϵ_t 的增加而线性增加，见图 2，也即上式描述了蠕变加速阶段的变化过程。

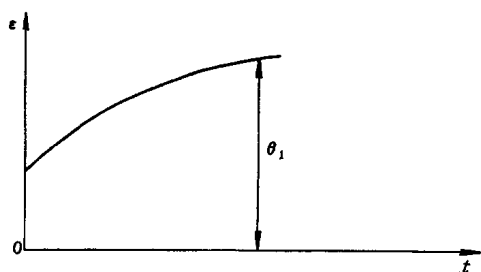


图 1 $\epsilon_p = \theta_1(1 - e^{-\theta_2 t})$ 式所描述的蠕变阶段变化过程

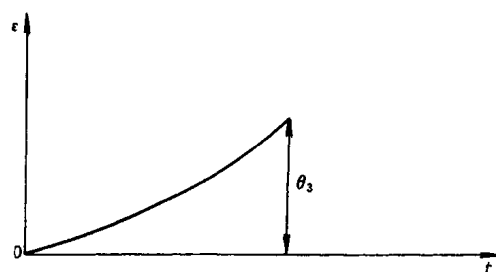


图 2 $\epsilon_t = \theta_3(e^{\theta_4 t} - 1)$ 式所描述的蠕变阶段的变化过程

2.2 θ 方程与蠕变速度

对 θ 方程 (2) 两边求一阶、二阶导数，则

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \theta_1 \theta_2 e^{-\theta_2 t} + \theta_3 \theta_4 e^{\theta_4 t} \quad (5)$$

$$\frac{d^2 \epsilon}{dt^2} = -\theta_1 \theta_2^2 e^{-\theta_2 t} + \theta_3 \theta_4^2 e^{\theta_4 t} \quad (6)$$

因此，蠕变速率

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \theta_1 \theta_2 e^{-\theta_2 t} + \theta_3 \theta_4 e^{\theta_4 t} \quad (7)$$

在确定 4 个 θ 参数值后，任一时间的蠕变速率可由式 (7) 求出。

2.1 中已阐述，蠕变曲线可认为由两部分组成，一部分为减速阶段，另一部分为加速阶段，两阶段之间的交点即为最小蠕变速度点，从数学角度讲，也即为蠕变曲线的拐点。

因此，欲求最小蠕变速率

令

$$\frac{d^2 \epsilon}{dt^2} = 0,$$

则

$$t_m = \frac{1}{\theta_2 + \theta_4} \ln \frac{\theta_1 \theta_2^2}{\theta_3 \theta_4^2}$$

将 t_m 代入式 (7), 即可求出最小蠕变速率 $\dot{\epsilon}_m$ 。

2.3 θ 参数与应力、温度之间的关系

作为一个唯像的数学处理, 已有若干参数公式在 θ 参数方程之前提出。实践表明: 由于那些所建立的关系式都有一个固定的函数关系, 以一些试验数据来适应这一关系, 求出其常数, 然后外推, 往往会产生一些局限性, 可能这种外推方法适合某一种钢而不适合另一种钢, 或者另一种方法适合另一种钢而不适合这种钢, 因此, 所提的参数方程很难得到广泛的应用。 θ 参数的特点, 在于较多地摆脱了固定函数式的束缚, 它仅为一个数学物理模型, 且能够概括现有常用的时间-温度参数的关系式, 不仅如此, 其参数除是材料特征常数外, 还与温度、应力相关, 从而更多地考虑了整个蠕变发展过程。

θ_i 同材料本身以及温度、应力水平存在以下关系:

$$\log \theta_i = a_i + b_i T + c_i \sigma + d_i \sigma T \quad (8)$$

a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 四个变量只与材料有关, 而同温度、应力无关, 在温度一定时, $\log \theta_i$ 与 σ_i 成线性关系。

3. 低合金钢用 θ 法模型的建立

前已阐述 θ 法是方程式 (1) 中第 2 项省略后的参数式, θ 法实际上是把蠕变过程看作是由蠕变第一和第三两个阶段组成。对于在高温高压下长期使用的低合金钢而言, 大量实验数据已表明: ①与整个蠕变过程相比, 蠕变的初始阶段所占份额很小; ②在蠕变变形的同时, 碳化物颗粒的析出与长大加速了蠕变发展, 使得蠕变第三阶段及早出现, 蠕变变形的整个过程呈“伪三阶段”。

在这种状况下, 直接采用 θ 法对数据进行处理, 将会面临以下几个问题:

(1) 第一阶段的数据很难获取, 目前国内几乎所有的蠕变试验机都是用砝码加载的, 断续性的加载实际上影响了蠕变初始阶段的曲线形状。

(2) 更为重要的是, 由于蠕变初始阶段的应变非常之小, 如果测量系统有微小的误差, 就会产生较大的相对误差, 从而将直接影响 θ 参数的获取, 给蠕变寿命的预测带来大的误差, 因此有必要对 θ 方程进行修正, 建立新的更为合理、简便、实用性强的 θ 参数式。

针对低合金钢在蠕变下的变形特点, 不考虑蠕变第一阶段, 参照陈国良、郭宏在高温合金寿命研究中提出的 θ 修正方程, 可获以下等式

$$\epsilon = \theta'_1 t + \theta'_2 (e^{\theta'_3 t} - 1)$$

此为 θ' 参数式, 为方便数据处理, 将 θ'_1 、 θ'_2 、 θ'_3 分别改写为 A 、 B 和 α , 则有以下式

$$\epsilon = At + B(e^{\alpha t} - 1) \quad (9)$$

4. θ 法处理结果

在 540℃、560℃ 下 10CrMo910 钢的蠕变断裂试验结果见传统法评估报告。采用修正后参数方程

$$\epsilon = At + B(e^{\alpha t} - 1)$$

对上述数据进行处理。结果如下：

4.1 计算程序

4.1.1 参数值的确定

修正后的方程仍是一个一元非线性方程，采用一个非线性回归的计算机程序对蠕变断裂数据进行拟合计算，可获得表 1 中的结果。

表 1 在不同温度下，经计算处理后的 A、B、 α 值

序号	钢号	温度 (℃)	应力 (kgf/mm ²) [●]	断裂寿命 (h)	A	B	α
1	10CrMo910	540	9	#10124	8.22×10^{-6}	9.1×10^{-7}	9.2705×10^{-4}
2			10	6436.9	2.437×10^{-5}	2.91×10^{-6}	1.756×10^{-3}
3			11	2158.95	7.212×10^{-5}	7.61×10^{-6}	4.5117×10^{-3}
4			12	981.67	1.9208×10^{-4}	9.81×10^{-5}	1.042749×10^{-2}
5			13	478.07	3.0267×10^{-4}	1.578×10^{-5}	2.000845×10^{-2}
6			14	199	9.1159×10^{-4}	1.890×10^{-5}	4.53086×10^{-2}
7		560	8	#9726	8.10×10^{-6}	8.471×10^{-7}	1.0837×10^{-3}
8			9	4907.6	2.808×10^{-5}	2.69×10^{-6}	2.29994×10^{-3}
9			10	1367.2	1.0928×10^{-4}	7.581×10^{-6}	7.21541×10^{-3}
10			11	516.5	2.7447×10^{-4}	3.829×10^{-5}	1.554117×10^{-2}
11			12	213.22	2.9396×10^{-4}	1.8761×10^{-4}	2.94094×10^{-2}
12			13	111.92	1.26011×10^{-3}	2.79184×10^{-3}	6.4792888×10^{-2}

注 符号“#”指该试样未断。

因是非线性回归处理，在计算时，应使 A、B、 α 值同时满足以下两个条件：①标准误差值最小。标准误差 $S_E = Q^{1/2} / (m-1)$ ，方差和 $Q = \sum_{i=1}^m [\epsilon(\lambda, t^i) - \epsilon_{\text{实测}}^i]^2$ ，(m 为参与回归数据点的数目， $\lambda = A, B, \alpha$)，也即，使方差和最小所得的 A、B、 α 值能使参数方程较好拟合实测蠕变曲线。②将 λ 值代入公式

$$\log \lambda = a_i + b_i \sigma + c_i T + d_i \sigma T \quad (\lambda = A, B, \alpha)$$

能使得 a_i, b_i, c_i, d_i 得以解出。从数学角度讲，满足①条件， λ 值可正可负，但若再满足②条件， λ 值必须为正，否则， a_i, b_i, c_i, d_i 四个常数无法通过公式 $\log \lambda = a_i + b_i \sigma + c_i T + d_i \sigma T$ 得到。

● 本文成文较早，根据现国家标准，所有图、表中的单位 kgf/mm² 应换算为国际单位制单位 MPa，1kgf/mm² = 9.8MPa。

4.1.2 不同温度下的 λ 值与应力之间的关系

将表 1 中 $\log \lambda$ 对数值与 σ 关系描绘成图 (图 3 和图 4), 由图知: 在 540℃、560℃ 下, $\log \lambda$ 与 σ 成直线关系。

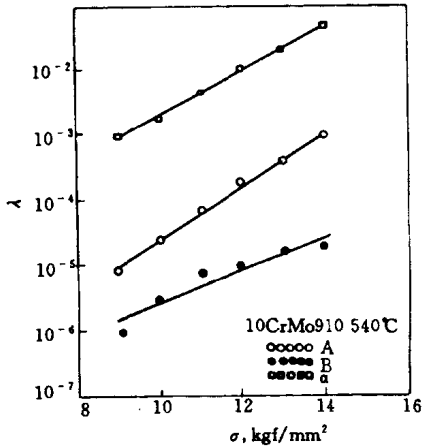


图 3 在 540℃ 下 $\log \lambda - \sigma$ 关系曲线

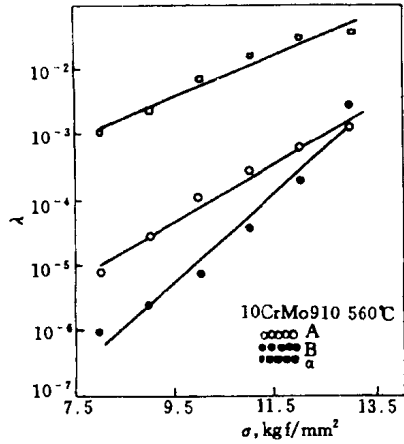


图 4 在 560℃ 下 $\log \lambda - \sigma$ 关系曲线

从图中可获得在 540℃、560℃ 任一应力水平下的 λ_i 值, 将 λ_i 值代入方程 (9) 中, 可获得相应条件下的蠕变方程。

如果从数学角度分别求解在 540℃、560℃ 下的直线方程, 方程 (8) 式可简化为

$$\log \lambda = a + b\sigma \quad (\lambda = A, B, \sigma)$$

将求解结果列入表 2, 由表知: 若欲求出 10CrMo910 钢在 540℃、70MPa 下的蠕变方程, 则经计算得:

$$A = 1.45 \times 10^{-6} \text{h}^{-1} \quad \log A = -8.680542 + 0.406 \times 7 = -5.838542$$

$$B = 4.47 \times 10^{-7} \text{mm} \quad \log B = -8.129202 + 0.254286 \times 7 = -6.3492$$

$$\alpha = 1.848 \times 10^{-4} \text{h}^{-1} \quad \log \sigma = -6.129130 + 0.3422657 \times 7 = -3.73327$$

将 A 、 B 、 α 代入方程 (9), 即可知, 在 540℃、70MPa 下 10CrMo910 钢蠕变过程服从以下变形规律:

$$\epsilon = 1.45 \times 10^{-6} t + 4.47 \times 10^{-7} (e^{1.8481 \times 10^{-4} t} - 1)$$

表 2 在 540℃、560℃ 下方程 $\log \lambda = a + b\sigma$ 中的 a 、 b 值

钢号	温度	参数 (λ)	a	b
10CrMo910	540℃	A	-8.680542	0.4068
		B	-8.129202	0.254286
		α	-6.129130	0.3422657
	560℃	A	-8.48268	0.4381597
		B	-11.72382	0.680674
		α	-5.44654	0.31961294

4.1.3 材料常数 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 的确定

根据表 1 中 λ 值的数据, 通过公式

$$\log \lambda = a_i + b_i T + c_i \sigma + d_i \sigma T$$

可以得到 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 四个常数, 可采用多元非线性回归方法在计算机上完成这部分工作。将计算的结果列入表 3。根据表 3, 可建立任一温度和应力下的蠕变变形方程。

表 3 10CrMo910 钢的 a 、 b 、 c 、 d 值

钢号	参数 (λ)	a	b	c	d	Var
10CrMo910	A	-13.36586000	-0.49809900	0.00870090	0.00167366	0.09656059
	B	44.73729000	-7.34893400	-0.09954596	0.01421982	0.26175200
	α	-16.30116000	0.22332160	0.01914409	0.00019414	0.10165830

4.2 蠕变曲线的拟合及其比较

将 540℃、560℃ 下的 λ_i 值代入方程式 (9), 可绘制出图 5 所示曲线, 此拟合曲线与

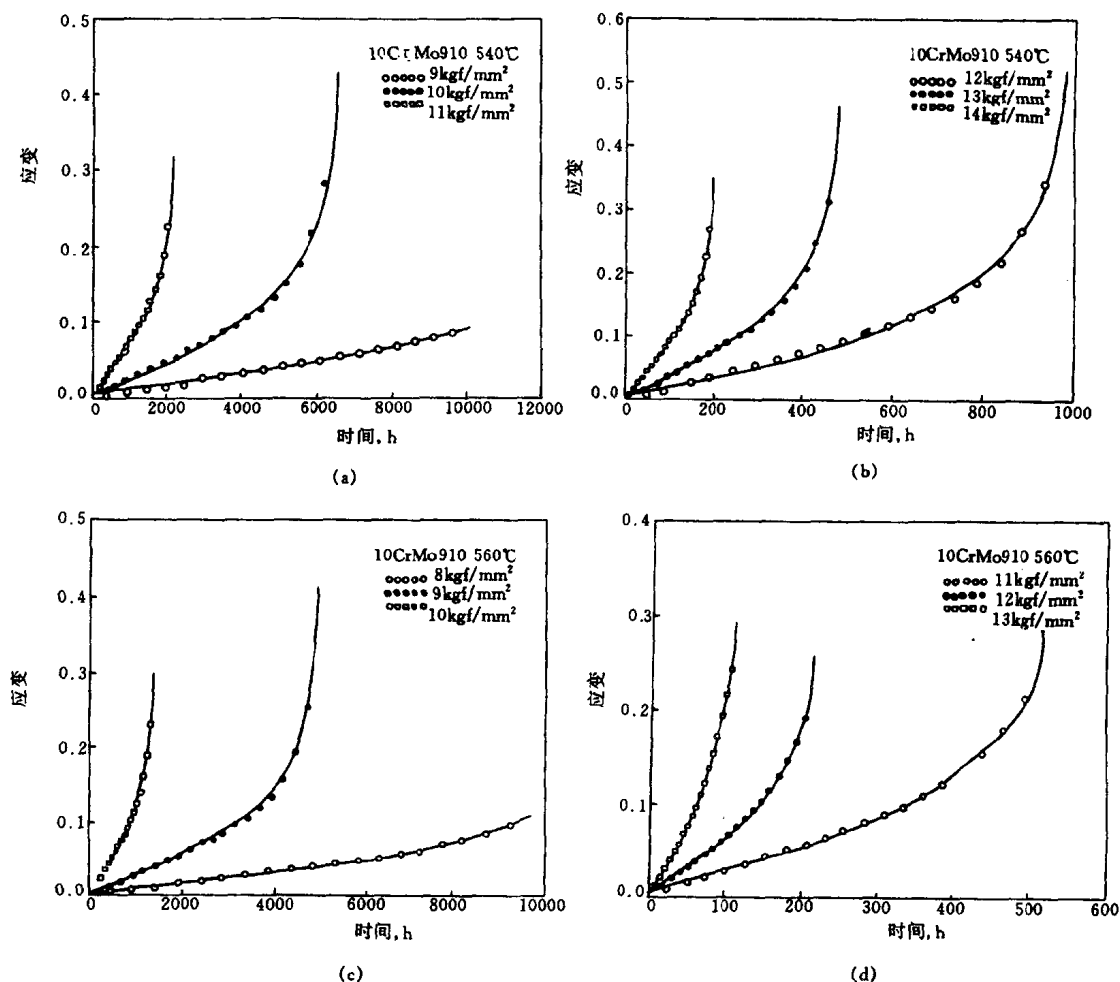


图 5 在不同温度和应力下的拟合蠕变曲线与实测变形曲线比较

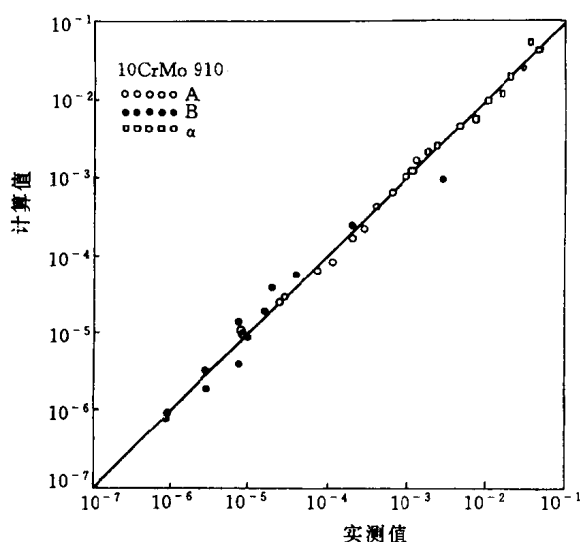


图6 实测值 λ_i 值与计算值 λ_i 值比较图

实测变形曲线吻合很好,进一步的比较见图6:由实测蠕变变形数据获得实测值 λ_i 与由材料常数 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 值计算出的计算值 λ_i 结果相一致,采用修正方程可较好地拟合蠕变变形曲线再次得以论证。

4.3 修正方程与最小蠕变速率

根据 θ 法,对 θ 方程一阶求导,即可得(7)式蠕变速率求解方程。将方程(8)中的 t_m 结果代入(7)式可求出最小蠕变速率值

$$\dot{\epsilon}_m = \frac{d\epsilon}{dt} = \theta_1 \theta_2 \exp(-\theta_2 t) + \theta_3 \theta_4 \exp(\theta_4 t)$$

然而对于修正后的方程(9)(见下式)

$$\epsilon = At + B(e^{at} - 1)$$

其最小蠕变速率 $\dot{\epsilon}_m \approx A$ 。实测最小蠕变速率与 A 值的比较见表4和图7、图8,比较表明, A 值与实测最小蠕变速率基本符合 $\dot{\epsilon}_m \approx A$ 关系。这进一步说明应用修正方程式(9)进行处理可得到较好的结果。值得注意的是:尽管理论上讲 $\dot{\epsilon}_m \approx A$,但实际计算的 A 值总稍高于 $\dot{\epsilon}_m$ 值,修正后的方程,由于不考虑蠕变第一阶段的存在,使得最小蠕变速率计算值偏大。因此采用修正后的方程外推寿命,其预测值偏保守。

表4

不同温度下最小蠕变速率与 A 值比较

(a) 540℃不同应力时的实测最小蠕变速率与 A 值结果

应力 (kgf/mm ²)		9	10	11	12	13	14
实测值 (%/h)	最小蠕变速率	6.74×10^{-6}	1.83×10^{-5}	5.68×10^{-5}	1.44×10^{-4}	3.23×10^{-4}	7.21×10^{-4}
	$\log \dot{\epsilon}_s$	-5.17134	-4.7375489	-4.24565	-3.8416375	-3.491	-3.1421
计算值 (%/h)	最小蠕变速率	8.22×10^{-6}	2.437×10^{-5}	7.212×10^{-5}	1.9208×10^{-4}	3.8267×10^{-4}	9.116×10^{-4}
	$\log \dot{\epsilon}_s$	-5.08513	-4.61314	-4.14194	-3.71652	-3.4171756	-3.040

(b) 560℃不同应力时的实测最小蠕变速率与 A 值结果

应力 (kgf/mm ²)		8	9	10	11	12	13
实测值 (%/h)	最小蠕变速率	6.80×10^{-6}	2.09×10^{-5}	8.64×10^{-5}	2.41×10^{-4}	5.23×10^{-4}	1.21×10^{-3}
	$\log \dot{\epsilon}_s$	-5.1675	-4.67985	-4.06349	-3.61798	-3.2815	-2.9172
计算值 (%/h)	最小蠕变速率	8.10×10^{-6}	2.808×10^{-5}	1.0928×10^{-4}	2.7447×10^{-4}	5.9396×10^{-4}	1.26011×10^{-3}
	$\log \dot{\epsilon}_s$	-5.091515	-4.5516	-3.96146	-3.5615	-3.226243	-2.8996

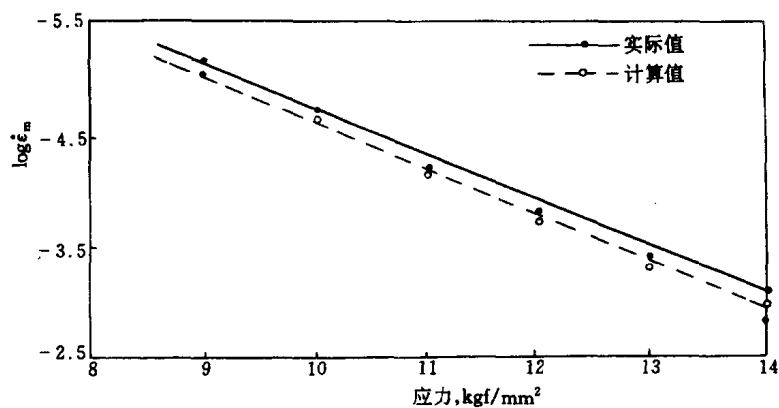


图7 在 540°C 下 $\dot{\epsilon}_m$ 与 A 值比较图

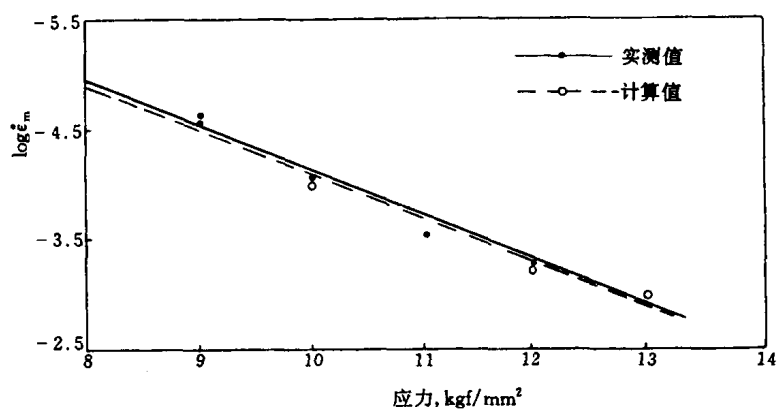


图8 在 560°C 下 $\dot{\epsilon}_m$ 与 A 值比较图

4.4 修正方程中的参数与激活能

4.4.1 A 与激活能

在 540°C、560°C 下,应力与最小蠕变速率的对数值关系由图 9 描述,在这一温度间隔里,蠕变速率对数值随应力增加而线性增加,两直线大体成平行,这符合 Norton's 法则。

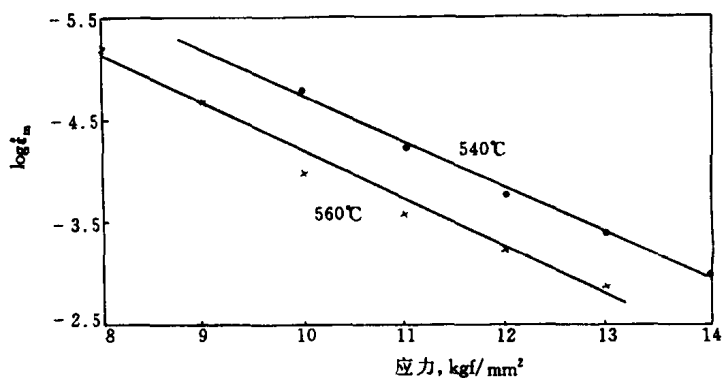


图9 应力与最小蠕变速率之间的关系