



中华人民共和国国家标准

GB/T 30580—2022

代替 GB/T 30580—2014

电站锅炉主要承压部件寿命评估技术导则

The technical guide for the life assessment of main pressure parts of
power plant boiler



2022-03-09 发布

2022-10-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	2
5 寿命评估前准备	2
6 寿命评估条件	3
7 寿命评估程序	4
8 寿命评估方法	5
9 寿命评估报告	20
附录 A (资料性) 电站锅炉承压部件的主要损伤模式	21
附录 B (资料性) 电站锅炉常用耐热钢在不同状态下的 k 、 m 值	22
附录 C (资料性) 电站锅炉常用耐热钢的低周疲劳参数	25

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替 GB/T 30580—2014《电站锅炉主要承压部件寿命评估技术导则》，与 GB/T 30580—2014 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 更改了规范性引用文件，用 GB/T 16507.4 替代 GB/T 9222（见第 2 章、5.3.4.1、6.4、8.2.3、8.4.1.2，2014 年版的第 2 章、5.3.4.1、6.6、8.2.3、8.4.1.2）；
- 删除了更换一般性部件进行寿命评估的内容（见 2014 年版的 6.4）；
- 增加了 10Cr18Ni9NbCu3BN(Super304H)、07Cr18Ni11Nb(TP347H)、07Cr25Ni21NbN(HR3C) 奥氏体耐热钢的 *L-M* 曲线及参数（见 8.1.2.7、8.1.2.8、8.1.2.9）；
- 增加了 07Cr18Ni11Nb/10Cr9Mo1VNbN(TP347H/T91) 异种钢焊接接头的 *L-M* 曲线及参数（见 8.1.2.10）；
- 增加了基于蠕变胀粗预测蠕变寿命的 C 射影方法（见 8.1.4）。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC 262)提出并归口。

本文件起草单位：中国特种设备检测研究院、上海发电设备成套设计研究院有限责任公司、苏州热工研究院有限公司、上海交通大学、西安热工研究院有限公司、国家能源集团新能源技术研究院有限公司、江苏省特种设备安全监督检验研究院、西安交通大学。

本文件主要起草人：钱公、车畅、窦文宇、史进渊、赵彦芬、李余德、蔡晖、郭元亮、汪勇、任爱、陈新中、李立人、梁军、张路、王笑梅、梁国安、廖晓炜、赵钦新、吾之英。

本文件 2014 年首次发布 GB/T 30580—2014，本次为第一次修订。



电站锅炉主要承压部件寿命评估技术导则

1 范围

本文件规定了电站锅炉主要承压部件寿命评估的内容,确立了寿命评估的程序,描述了寿命评估的方法,规定了寿命评估报告的内容。

本文件适用于在用电站锅炉承压部件的寿命评估。本文件不适用于存在超标缺陷电站锅炉承压部件的寿命评估。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 2039 金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法

GB/T 15248 金属材料轴向等辐低循环疲劳试验方法

GB/T 16507.4 水管锅炉 第4部分:受压元件强度计算

ASME BPVC-III-1/NH-2021 锅炉及压力容器规范第三卷第一册分卷 NH 高温一级部件(Boiler & Pressure vessel code III division 1-subsection NH class1-components elevated temperature service)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

疲劳 fatigue

材料或部件在循环应力或应变作用下,在某点或某些点逐渐产生局部的累积损伤,经一定循环次数后形成裂纹或继续扩展直至完全断裂的现象。

3.2

低周疲劳 low-cycle fatigue

在局部循环塑性应变作用下,循环周次一般低于 10^5 次循环的疲劳。

3.3

蠕变 creep

在一定的温度下,金属材料或机械部件在长时间的恒定应力作用下发生缓慢塑性变形的现象。

3.4

持久强度 durative strength

材料在规定的蠕变断裂条件(一定的温度和规定的时间)下保持不失效的最大承载应力。

3.5

腐蚀 corrosion

材料与环境之间的化学或电化学反应。

3.6

磨损 abrasion

由于摩擦而导致的金属表面的损伤。

3.7

剩余寿命 remaining life; residual life

承压部件在服役条件下能够保障继续安全运行的剩余时间或疲劳循环次数。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

CFD 计算流体力学(Computational Fluid Dynamics)

FEA 有限元分析(Finite Element Analysis)

NDE/T 无损检测(Non Destructive Examination/Test)

NHT 数值传热学(Numerical Heat Transfer)

5 寿命评估前准备

5.1 基本资料采集

5.1.1 电站锅炉承压部件设计资料包括制造单位信息、炉型、设计依据、部件材料质量证明文件及其力学性能试验报告、制造工艺文件、结构图纸、强度计算书、管道系统设计资料等。

5.1.2 电站锅炉承压部件出厂质量证明书、检验报告或记录等。

5.1.3 电站锅炉安装资料,重要安装焊口的工艺检查资料,主要缺陷的处理记录,高温蒸汽管道安装的预拉紧记录等。

5.1.4 电站锅炉运行资料包括机组投运时间、累计运行小时数等。

5.1.5 电站锅炉典型的负荷记录(或代表日负荷曲线),调峰运行方式等。

5.1.6 电站锅炉冷态启动、温态启动、热态启动、极热态启动以及滑参数停机、正常停机、异常停机次数等。

5.1.7 电站锅炉历次事故和事故分析报告。

5.1.8 电站锅炉运行记录,包括承压部件实际运行的温度、压力及其波动范围,是否有长时间超设计参数(温度、压力等)运行等。

5.1.9 电站锅炉历年可靠性统计资料。

5.1.10 电站锅炉承压部件维修与更换记录。

5.1.11 电站锅炉历次检修检查记录,包括部件内外观检查、NDE/T、几何尺寸测定、材料成分分析、金相检查、硬度测量、蠕胀测量、腐蚀磨损状况检查和部件的支吊系统检查等记录。

5.1.12 历次检验报告。

5.1.13 电站锅炉未来的运行计划。

5.2 损伤模式

电站锅炉各承压部件主要损伤模式见附录 A,根据部件的主要损伤模式选择适用的寿命评估方法。

5.3 寿命评估所需要的各项数据以及获得方式

5.3.1 寿命评估所需材料性能数据

5.3.1.1 力学性能包括常温和工作温度下的拉伸与冲击性能、低周疲劳或疲劳-蠕变交互作用特性、韧

脆转变温度、硬度、持久强度、蠕变极限等。

5.3.1.2 物理性能包括弹性模量、泊松比、线膨胀系数、比热容、热导率等。

5.3.1.3 化学性能包括氧化速率、腐蚀速率等。

5.3.1.4 微观组织包括球化或老化级别、裂纹、石墨化级别等,对于高铬的马氏体、奥氏体耐热钢必要时应增加马氏体板条、位错及第二相析出等的透镜检查。

5.3.2 材料性能数据的获得

5.3.2.1 在条件许可的情况下,应在部件服役条件最苛刻的部位取样进行相关的材料性能试验。

5.3.2.2 若直接在部件上取样有困难,可选用与部件材料牌号相同、工艺相同(保证微观组织和硬度范围的一致性)的原材料进行试验(至少有一组试验应在与部件工作温度相同的温度下进行)。

5.3.2.3 如在短时间内不能取得实际试验数据,可参考相同牌号、相同状态材料已积累的数据的下限值。

5.3.2.4 若以上条件不具备时,可采用微试样法来获得材料性能数据。

5.3.3 承压部件高应力危险部位应力分析

5.3.3.1 管道受力分析时应依据管道目前的支吊状况及有关管系设计、安装原始资料,对管系进行应力分析,找出其最大受力部位,并确定其应力水平,尤其是管系中弯头承受的附加应力。

5.3.3.2 锅炉锅筒和汽水分离器的应力分析应考虑到承压产生的应力、热应力和弯曲应力,此外,还应考虑筒体角变形、焊缝错边和筒体不圆度引起的应力集中及下降管接管座角焊缝处的应力集中。

5.3.3.3 高温管道、三通和集箱主要计算承压产生的应力及热应力,但应考虑接管开孔处的应力集中。

5.3.3.4 对结构较为复杂的焊接部件,应考虑焊接残余应力的影响。

5.3.4 应力水平的获得

5.3.4.1 按照 GB/T 16507.4 进行应力计算。

5.3.4.2 对复杂结构和复杂应力状态的承压部件,也可采用 FEA 进行应力分析。

5.3.4.3 采用应力(应变)测量装置对监测部位进行实际测量。

5.3.5 确定承压部件金属壁温的考虑因素

5.3.5.1 锅筒、三通、集箱和管道沿壁厚方向温度分布的不均匀性。

5.3.5.2 高温集箱沿长度方向温度分布的不均匀性。

5.3.5.3 过热器、再热器管子管外烟气速度、温度分布和管内蒸汽速度、温度分布的不均匀性。

5.3.6 金属壁温的获得

5.3.6.1 采用成熟的传热公式进行金属壁温计算。

5.3.6.2 在应用合理的数学物理模型的基础上,采用数值分析法(CFD、NHT)来确定金属壁温。

5.3.6.3 通过布置在承压部件外壁的测温装置(如热电偶)直接测量承压部件金属壁温,对炉内过热器、再热器管,在布置测温装置时应考虑管子内外壁氧化层对测量精度的影响以及飞灰磨损和烟气腐蚀而引起的测温装置的脱落或失效。

5.3.6.4 采用红外热像仪非接触式测量金属壁温。

6 寿命评估条件

6.1 电站锅炉承压部件运行时间不少于 30 年或 20 万 h(以先到为准)时,应进行寿命评估。

6.2 对于曾提高参数(相对于设计参数)运行的电站锅炉主要承压部件、以及采用高合金马氏体钢的主蒸汽管道、再热蒸汽管道(热段)、集箱等部件,进行寿命评估的运行时间应适当提前。

6.3 对超过规定允许启停次数或启停频繁以及参与调峰的锅炉,应对锅筒、汽水分离器进行低周疲劳寿命评估,对高温蒸汽管道和高温集箱进行疲劳-蠕变寿命评估。

6.4 主蒸汽管道、再热蒸汽管道(热段)、锅筒、集箱的实测壁厚小于按照 GB/T 16507.4 计算得到的理论计算壁厚时,应进行寿命评估。

6.5 主蒸汽管道、再热蒸汽管道(热段)、高温集箱存在以下情况之一时,应进行寿命评估:

- a) 组织老化(如球化、石墨化以及析出相种类、尺寸、分布异常等)程度较为严重;
- b) 蠕变相对变形量或蠕变速率较大;
- c) 硬度异常。

6.6 对腐蚀、磨损速率较大的受热面管子,应进行寿命评估。

6.7 根据电站锅炉承压部件的检验结果,检验人员或使用单位认为有必要进行寿命评估时,应进行寿命评估。

7 寿命评估程序

7.1 通用程序

电站锅炉主要承压部件寿命评估的通用程序见图 1。

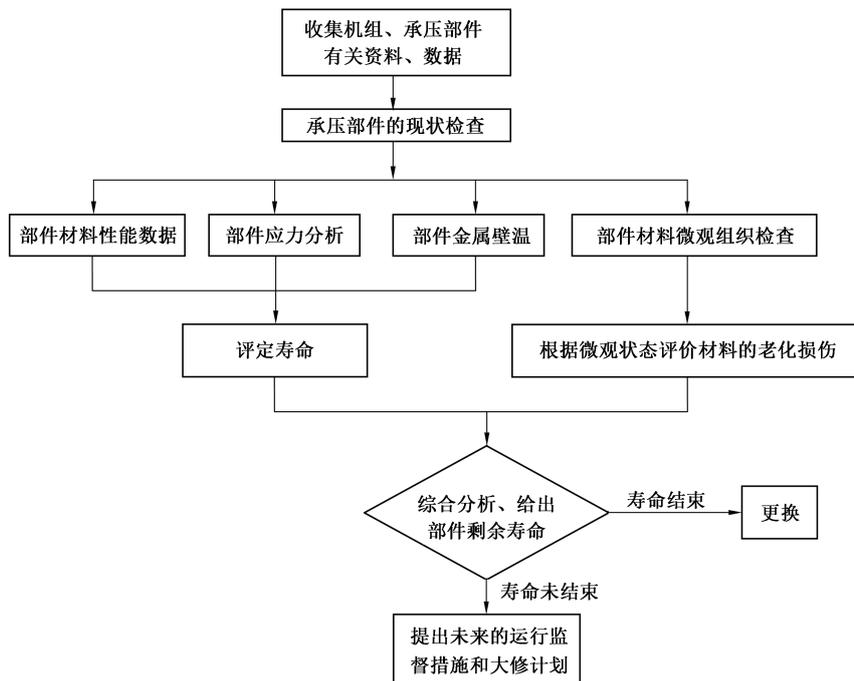


图 1 电站锅炉承压部件寿命评估通用程序

7.2 三级评估

7.2.1 I级评估:寿命的初步评估。通过审查电站锅炉的设计、制造、安装、运行、历次检修及对主要承压部件的检验与测试记录、事故情况、更新改造等资料来确定承压部件的寿命。

7.2.2 II级评估:寿命的较精确评估。通过对承压部件的当前状态进行初步检查、用经验公式计算应力、测量尺寸和运行工况等来取得II级评估所需要的数据。当承压部件已运行时间超出I级评估确定

的寿命时,应进行Ⅱ级评估。

7.2.3 Ⅲ级评估:寿命的精确评估。通过对承压部件的应力进行 FEA 或实际测量,并取样对材料特性进行测量。当承压部件已运行时间超出Ⅱ级评估确定的寿命时,应进行Ⅲ级评估。

7.2.4 三级评估需要的资料见表 1。

表 1 三级评估所需资料

所需资料	I 级评估	Ⅱ级评估	Ⅲ级评估
设计、制造和安装资料	电厂及制造厂资料	电厂及制造厂资料	电厂及制造厂资料
运行历程	电厂记录	电厂记录	电厂记录
事故、维修记录	电厂记录	电厂记录	电厂记录
温度和压力	设计或实际运行值	实际运行或测量值	实际运行或测量值
运行工况	运行记录或额定参数	运行记录	运行记录
蠕变测量数据	检修记录	检修记录	检修记录
部件几何尺寸	设计制造资料	测量值	测量值
无损探伤	检测	检测	检测
是否取样	否	否	是
微观组织	不检测	现场复型金相	现场复型+实验室试验 (不可取样的部件除外)
硬度	不检测	检测	检测
材料特性	查阅资料,取最低值	查阅资料,取最低值	试验测定,取最低值 (不可取样的部件除外)

8 寿命评估方法

8.1 蠕变损伤寿命评估

8.1.1 等温线外推法

8.1.1.1 适用于 450 ℃以上碳钢、合金钢的受热面管、管道及集箱的蠕变寿命评估。在使用中,应结合部件材料微观组织的老化特征进行寿命评估。

8.1.1.2 选择与部件工作温度相同的温度,按 GB/T 2039 进行材料的持久断裂试验。

8.1.1.3 按公式(1)对试验数据应力-断裂时间用最小二乘法进行拟合,作出材料的持久强度曲线,见图 2。

$$\sigma = k(t_r)^m \dots\dots\dots (1)$$

式中:

σ ——试样加载的应力水平,单位为兆帕(MPa);

k ——由试验确定的材料系数;

t_r ——断裂时间,单位为小时(h);

m ——由试验确定的材料指数。

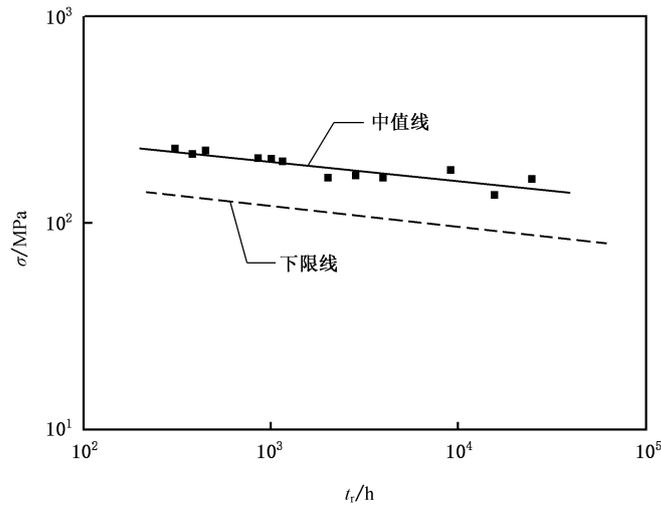


图 2 材料的持久强度曲线

8.1.1.4 电站锅炉常用耐热钢在不同状态下的 k 、 m 值见附录 B。

8.1.1.5 按公式(1),外推材料某一规定时间的持久强度 σ 时,外推的规定时间应小于最长试验点时间的 10 倍。对于 9Cr~12Cr 钢,根据实际条件外推的规定时间宜小于最长试验点时间 3 倍。

8.1.1.6 确定部件工作条件下的最大应力部位及最大应力(σ_{\max})。

8.1.1.7 按公式(2)计算断裂时间。

$$\lg \frac{t_r}{10^4} = \frac{\lg \frac{n\sigma_{\max}}{\sigma_{10^4}^t}}{\lg \frac{\sigma_{10^5}^t}{\sigma_{10^4}^t}} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$\sigma_{10^4}^t$ 、 $\sigma_{10^5}^t$ ——分别为某一温度下 1 万 h 和 10 万 h 的持久强度,单位为兆帕(MPa);

n ——安全系数,按中值线时, n 取 1.5;按下限线时, n 取 1.2。见图 2。

8.1.1.8 累积蠕变损伤的计算,按每一温度、应力等级分别计算每一损伤单元,这些损伤的总和达到 1 时,承压部件失效。累积蠕变损伤(D_1)按公式(3)计算。

$$D_1 = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{t_{ri}} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

t_i ——承压部件在第 i 种应力与温度下的运行时间;

t_{ri} ——承压部件在第 i 种应力与温度下的蠕变断裂时间。

8.1.2 L-M 参数法

8.1.2.1 适用于 450 °C 以上碳钢、合金钢的受热面管、管道及集箱的蠕变寿命评估。L-M 参数是时间和温度二者相结合的参数,以 $P(\sigma)$ 表示,按公式(4)计算。

$$P(\sigma) = T(C + \lg t_r) \dots\dots\dots (4)$$

式中:

T ——试验温度,单位为开尔文(K);

C ——材料常数;

t_r ——断裂时间,单位为小时(h)。

8.1.2.2 确定材料的 L-M 参数,选部件工作温度及其附近共 3 个温度,在每一温度下至少进行 4 个应

力水平下的持久断裂试验。按公式(5)对试验数据进行多元线性回归处理求解出 C 值:

$$\lg t_r = (C_0 + C_1 \lg \sigma + C_2 \lg^2 \sigma + C_3 \lg^3 \sigma + C_4 \lg^4 \sigma) / T - C \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

C_0, C_1, C_2, C_3, C_4 ——拟合系数。

依据拟合出的公式,绘制 $P(\sigma)$ - σ 曲线。

8.1.2.3 12Cr2Mo(T/P22)钢的 L - M 参数 [$P(\sigma)$]按公式(6)计算。

$$P(\sigma) = T(20 + \lg t_r) \quad \dots\dots\dots (6)$$

12Cr2Mo(T/P22)钢的 $P(\sigma)$ - σ 曲线见图 3。

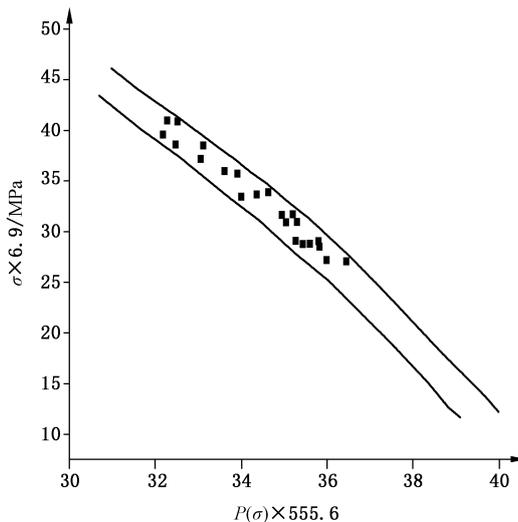


图 3 12Cr2Mo(T/P22)钢的 $P(\sigma)$ - σ 曲线

8.1.2.4 12Cr1MoV 钢的 L - M 参数 [$P(\sigma)$]按公式(7)计算。

$$P(\sigma) = T(22 + \lg t_r) \quad \dots\dots\dots (7)$$

12Cr1MoV 钢的 $P(\sigma)$ - σ 曲线见图 4。

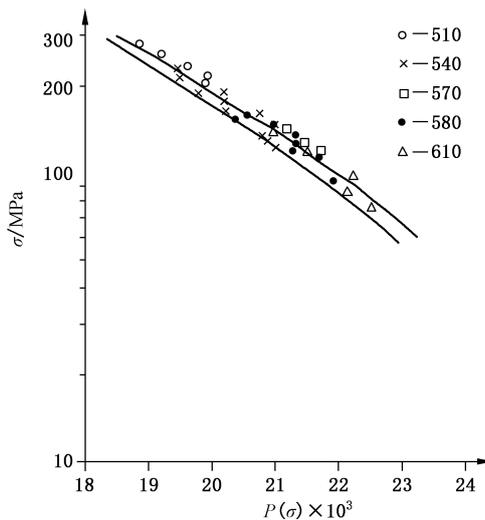


图 4 12Cr1MoV 钢的 $P(\sigma)$ - σ 曲线

8.1.2.5 10Cr9Mo1VNbN(T/P91)钢的 L - M 参数 [$P(\sigma)$]按公式(8)计算。

$$P(\sigma) = T(30 + \lg t_r) \quad \dots\dots\dots (8)$$

10Cr9Mo1VNbN(T/P91)钢的 $P(\sigma)$ - σ 曲线见图 5。

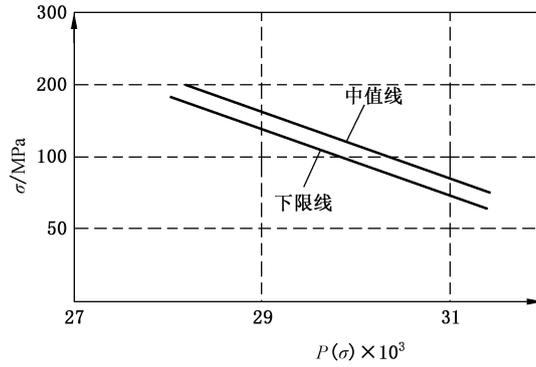


图 5 10Cr9Mo1VNbN(T/P91)钢的 $P(\sigma)$ - σ 曲线

8.1.2.6 10Cr9MoW2VNbBN(T/P92)钢的 L - M 参数 $[P(\sigma)]$ 按公式(9)计算。

$$P(\sigma) = T(36 + \lg t_r) \quad \dots\dots\dots (9)$$

10Cr9MoW2VNbBN(T/P92)钢的 $P(\sigma)$ - σ 曲线见图 6。

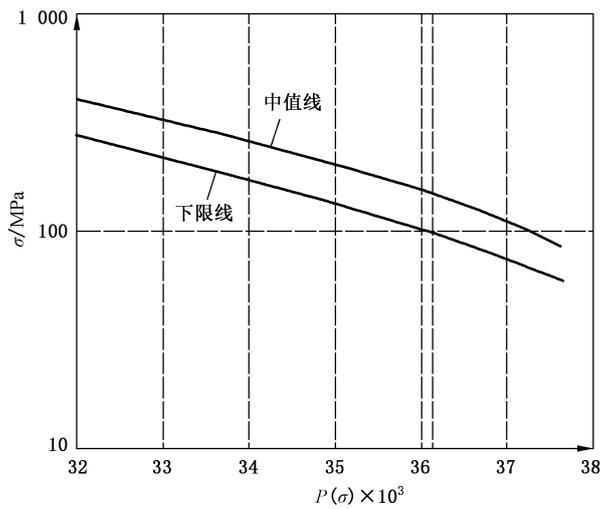


图 6 10Cr9MoW2VNbBN(T/P92)钢的 $P(\sigma)$ - σ 曲线

8.1.2.7 10Cr18Ni9NbCu3BN(Super304H)钢的 L - M 参数 $[P(\sigma)]$ 按公式(10)计算。

$$P(\sigma) = T(17 + \lg t_r) \quad \dots\dots\dots (10)$$

10Cr18Ni9NbCu3BN(Super304H)钢的 $P(\sigma)$ - σ 曲线见图 7。



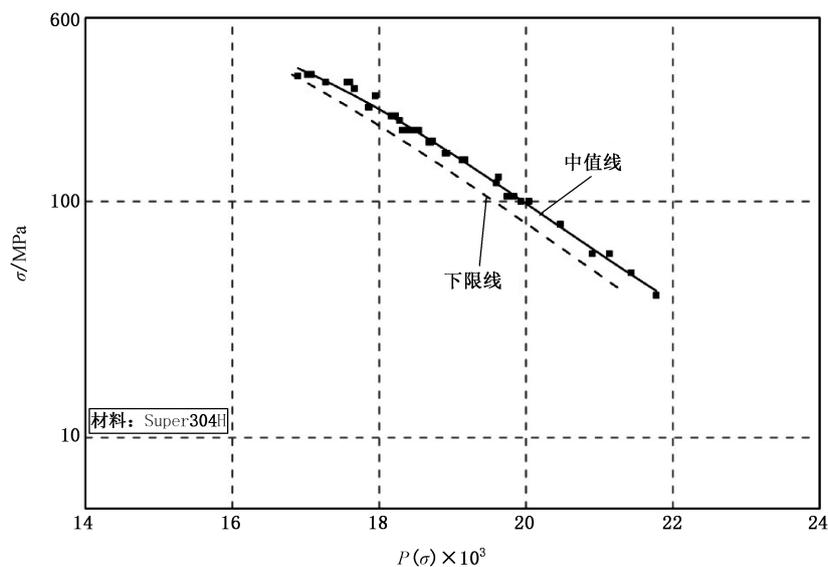


图 7 10Cr18Ni9NbCu3BN (Super304H) 钢的 $P(\sigma)$ - σ 曲线

8.1.2.8 07Cr18Ni11Nb(TP347H) 钢的 L - M 参数 $[P(\sigma)]$ 按公式(11)计算。

$$P(\sigma) = T(14 + \lg t_r) \dots\dots\dots (11)$$

07Cr18Ni11Nb(TP347H) 钢的 $P(\sigma)$ - σ 曲线见图 8。

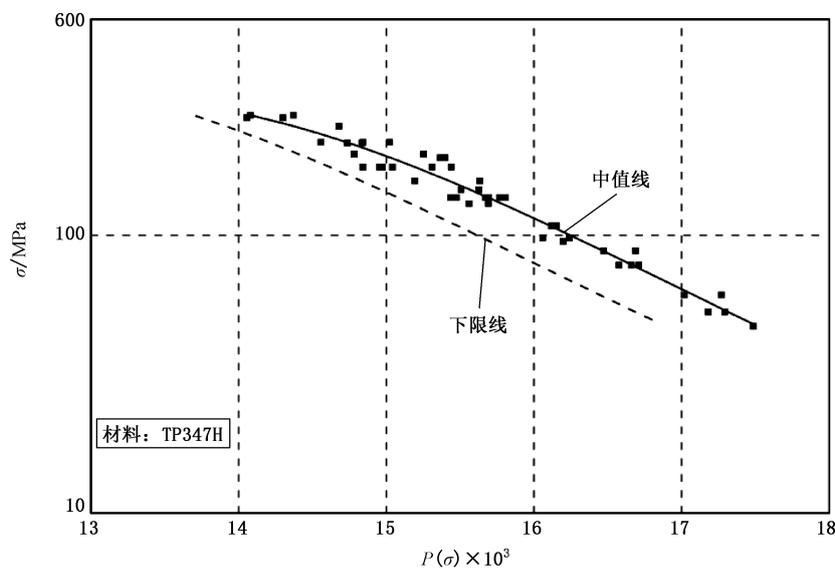


图 8 07Cr18Ni11Nb (TP347H) 钢的 $P(\sigma)$ - σ 曲线

8.1.2.9 07Cr25Ni21NbN(HR3C) 钢的 L - M 参数 $[P(\sigma)]$ 按公式(12)计算。

$$P(\sigma) = T(15 + \lg t_r) \dots\dots\dots (12)$$

07Cr25Ni21NbN(HR3C) 钢的 $P(\sigma)$ - σ 曲线见图 9。

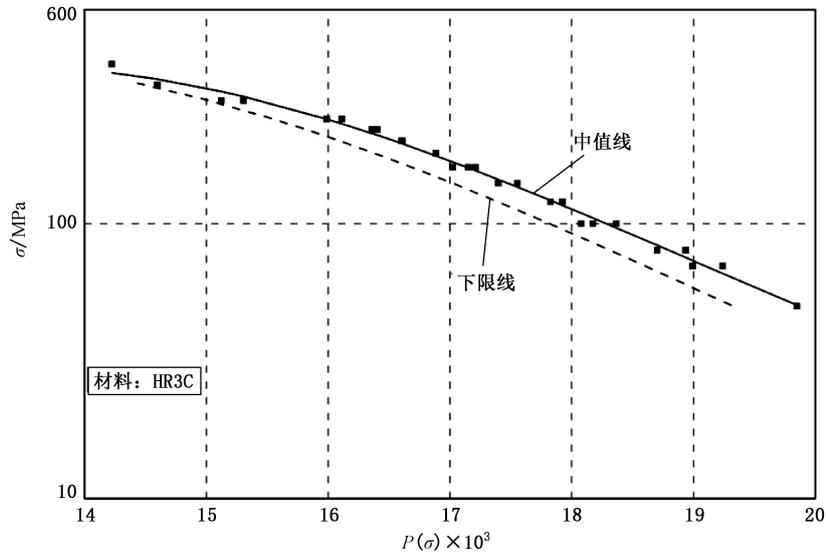


图 9 07Cr25Ni21NbN(HR3C)钢的 $P(\sigma)$ - σ 曲线

8.1.2.10 07Cr18Ni11Nb /10Cr9Mo1VNbN (TP347H/T91)异种钢焊接接头的 L - M 参数 $[P(\sigma)]$ 按公式(13)计算。

$$P(\sigma) = T(28 + \lg t_r) \quad \dots\dots\dots (13)$$

07Cr18Ni11Nb /10Cr9Mo1VNbN (TP347H/T91)异种钢焊接接头的 $P(\sigma)$ - σ 曲线见图 10。

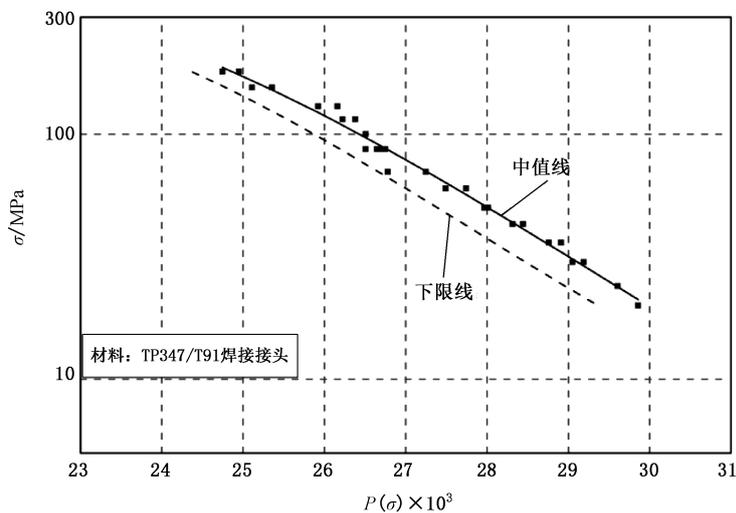


图 10 07Cr18Ni11Nb /10Cr9Mo1VNbN(TP347H/T91)异种钢焊接接头的 $P(\sigma)$ - σ 曲线

8.1.2.11 确定部件工作条件下的最大应力部位及最大应力(σ_{max})。

8.1.2.12 从 $P(\sigma)$ - σ 曲线上查得部件最大应力对应的 L - M 参数 $[P(\sigma)]$ 。

8.1.2.13 按公式(4)、或公式(6)、或公式(7)、或公式(8)、或公式(9)、或公式(10)、或公式(11)、或公式(12)、或公式(13)确定部件蠕变断裂寿命。

8.1.3 θ 法

8.1.3.1 适用于 450 °C 以上碳钢、合金钢的管道的蠕变寿命评估。

8.1.3.2 用一组试样在不同温度、不同应力水平下,按 GB/T 2039 进行蠕变断裂试验,获得各试样在某一温度、应力下的蠕变曲线,见图 11。

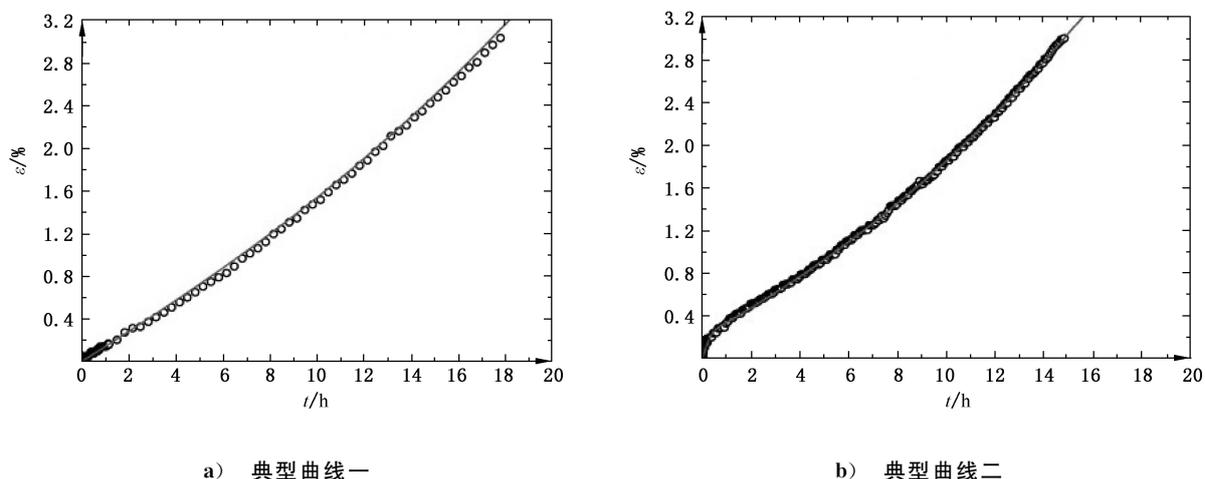


图 11 典型的蠕变曲线

8.1.3.3 按公式(14)拟合试验条件下的蠕变曲线,见图 11,求解每一试样蠕变方程中的 θ_i ($i=1,2,3,4$)。

$$\epsilon = \theta_1 (1 - e^{-\theta_2 t}) + \theta_3 (e^{\theta_4 t} - 1) \dots\dots\dots(14)$$

式中:

- ϵ ——蠕变应变, %;
- θ_1, θ_3 ——蠕变第一阶段和第三阶段的蠕变应变参数, θ_1, θ_3 与应力的关系见图 12;
- θ_2, θ_4 ——蠕变第一阶段和第三阶段的蠕变曲线的速率参数, θ_2, θ_4 与应力的关系见图 13;
- t ——蠕变时间,单位为小时(h)。

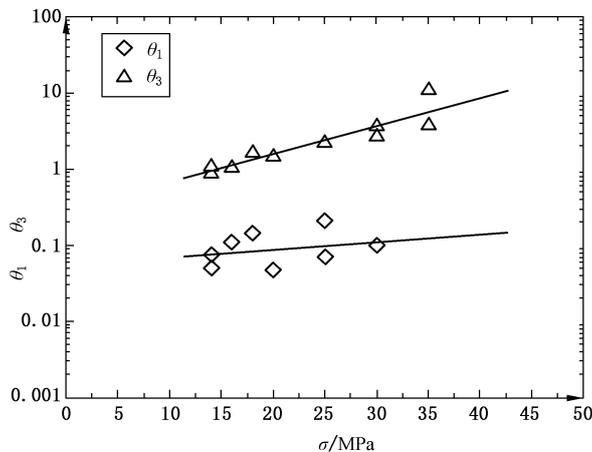


图 12 θ_1, θ_3 与应力的关系

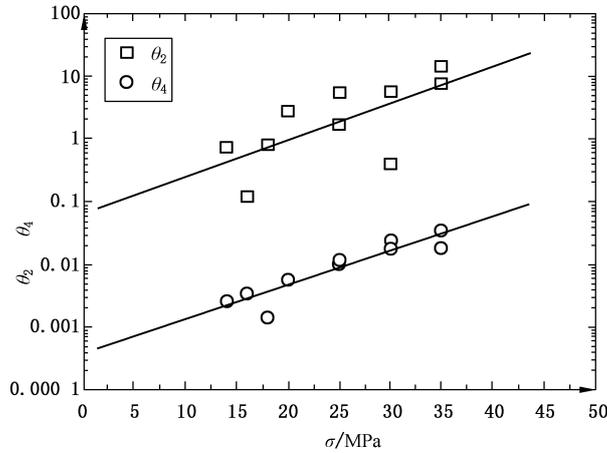


图 13 θ_2 、 θ_4 与应力的关系

8.1.3.4 按公式(15)求出试验条件下的 a_i 、 b_i 、 c_i 和 d_i ：

$$\lg \theta_i = a_i + b_i \sigma + c_i T + d_i \sigma T \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中：

T —— 试验温度，单位为开尔文(K)；

a_i 、 b_i 、 c_i 和 d_i —— 与应力、温度有关的系数。

8.1.3.5 根据求解的 a_i 、 b_i 、 c_i 和 d_i ，将所要预测部件的温度(T)和应力(σ)代入公式(15)中求出实际部件的 θ_i ($i=1, 2, 3, 4$)。

8.1.3.6 将实际的温度、应力下的 θ_i 代入公式(14)，确定所要评定的蒸汽管道在其服役条件(温度、应力)下的材料蠕变曲线。

8.1.3.7 给定一个蠕变应变值按公式(14)即可确定对应于这个给定值的蠕变寿命。

8.1.4 C 射影法

8.1.4.1 在主蒸汽管道和再热蒸汽管道(热段)的最高温度、高应力截面、初始椭圆度大的弯管和管壁最薄处安装蠕变测点，准确测量直管截面蠕变应变(t_i, ϵ_i)或弯管的椭圆度(t_i, e_i) ($i=1, 2, 3, \dots, N, i$ 为测量次数)。

8.1.4.2 待测得的蠕变数据达 6 次及以上($N \geq 6$)，且数据测量的时间跨度超过 15 万 h，并含有蠕变第三阶段的变形特征之后，整理出直管的(t_i, ϵ_i)或弯管的(t_i, e_i)。将整理好的(t_i, ϵ_i)或(t_i, e_i)数据，按公式(16)计算出系数 C_j ：

$$\epsilon = \epsilon_i = \sum_{j=0}^{2n-1} C_j t_i^j \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中：

ϵ —— 蠕变应变，%；

C_j —— 评估截面的 C 射影系数，与材料和运行工况有关；

t —— 运行时间，单位为小时(h)；

对于弯管，按公式(16)的蠕变应变 ϵ 替换为弯管截面的椭圆度 e 进行计算。

8.1.4.3 使 ϵ_i 等于 1.0% 时，按公式(17)计算相应蠕变量值的条件寿命时间。

$$\epsilon_t - \sum_{j=0}^{2n-1} C_j t^j = 0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

可确定所测量截面的条件蠕变寿命 t 。

8.2 疲劳损伤寿命评估

8.2.1 确定材料的 S_a - N_f (应力幅-寿命)设计疲劳曲线

8.2.1.1 材料的虚拟应力幅-寿命(S_{eq} - N_f)曲线按公式(18)确定:

$$S_{eq} = \sigma'_f (N_f)^b + E \epsilon'_f (N_f)^c \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中:

S_{eq} ——虚拟应力幅,单位为兆帕(MPa);

σ'_f ——疲劳强度系数,单位为兆帕(MPa);

N_f ——疲劳循环次数;

b ——疲劳强度指数;

E ——材料的弹性模量,单位为兆帕(MPa);

ϵ'_f ——疲劳延性系数;

c ——疲劳延性指数。

8.2.1.2 如果没有材料的低周疲劳试验结果,则可按公式(19)确定 S_{eq} :

$$S_{eq} = 3.5 R_m (N_f)^{-0.12} + E \epsilon_f^{0.6} (N_f)^{-0.6} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中:

R_m ——材料的抗拉强度,单位为兆帕(MPa)。

ϵ_f ——材料断裂真应变, $\epsilon_f = \ln \frac{100}{100-\psi}$;

ψ ——材料的断面收缩率, %;

8.2.1.3 对虚拟应力幅-寿命曲线进行平均应力修正按公式(20)确定:

$$S'_a = S_{eq} \left(\frac{R_m - R_{eL}}{R_m - S_{eq}} \right) \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中:

S'_a ——平均应力修正后的虚拟应力幅,单位为兆帕(MPa);

R_{eL} ——材料的屈服强度,单位为兆帕(MPa)。

8.2.1.4 锅筒的低周疲劳设计曲线见图 14。



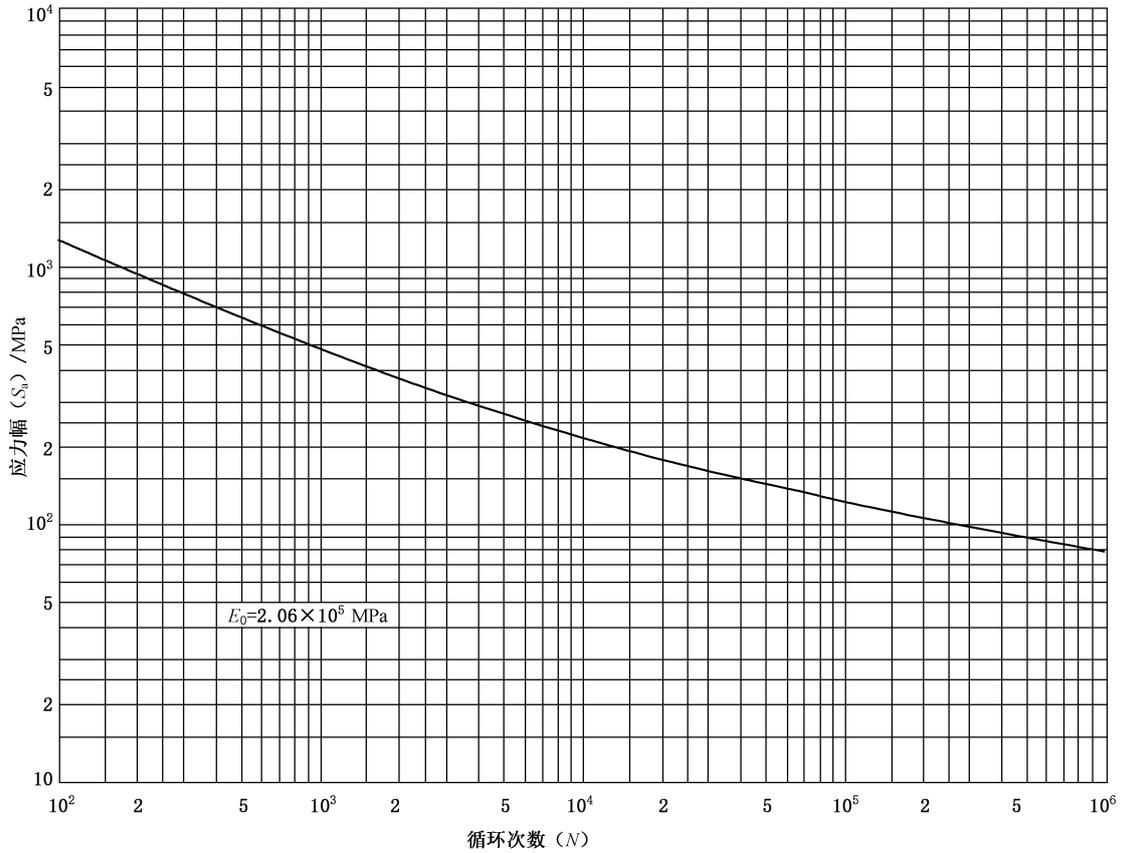


图 14 锅筒的疲劳设计曲线(≤375 °C)

8.2.1.5 温度不超过 375 °C 的碳钢、低合金钢的设计疲劳曲线见图 15。

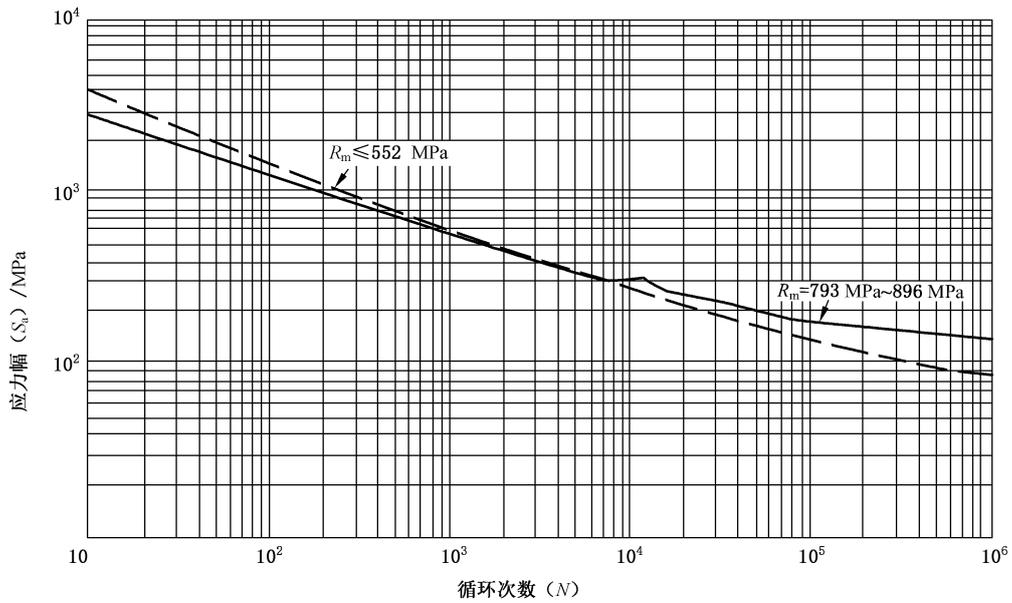


图 15 温度不超过 375 °C 的碳钢、低合金钢的设计疲劳曲线

8.2.1.6 温度不超过 425 °C 和应力幅 $S_a > 194$ MPa 的奥氏体不锈钢的设计疲劳曲线见图 16。

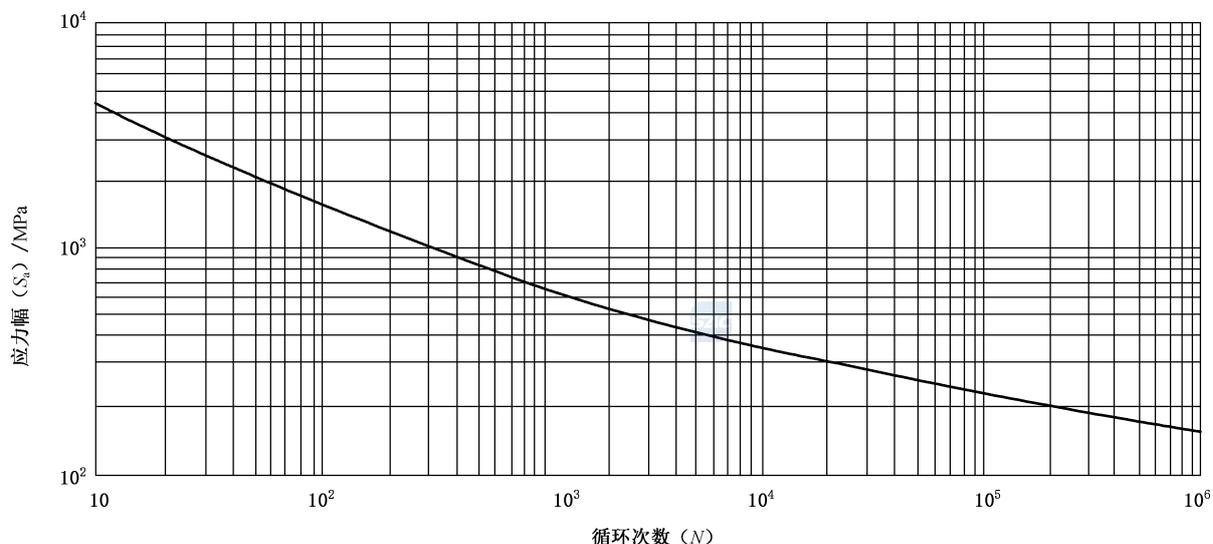


图 16 温度不超过 425 °C 和应力幅 $S_a > 194$ MPa 的奥氏体不锈钢的设计疲劳曲线

8.2.2 确定材料的 ϵ_e - N_f (应变幅-寿命) 设计疲劳寿命曲线

8.2.2.1 按 GB/T 15248 进行材料的低循环疲劳试验。

8.2.2.2 按公式(21)回归材料的低周疲劳曲线：

$$\epsilon_a = \frac{\Delta\epsilon}{2} = \epsilon_e + \epsilon_p = \frac{\sigma'_f}{E} (N_f)^b + \epsilon'_f (N_f)^c \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中：

- ϵ_a ——总应变幅；
- $\Delta\epsilon$ ——应变范围；
- ϵ_e ——弹性应变幅；
- ϵ_p ——塑性应变幅；
- σ'_f ——疲劳强度系数,单位为兆帕(MPa)；
- E ——材料的弹性模量,单位为兆帕(MPa)；
- b ——疲劳强度指数；
- ϵ'_f ——疲劳延性系数；
- c ——疲劳延性指数；
- N_f ——裂纹萌生疲劳循环次数。

8.2.2.3 电站锅炉常用耐热钢的疲劳试验曲线的参数见附录 C。

8.2.2.4 在缺少 ϵ_a - N_f 曲线试验的情况下,可按公式(22)确定材料的 ϵ_a - N_f 疲劳曲线。

$$\epsilon_a = \frac{\Delta\epsilon}{2} = 3.5 \frac{R_m}{E} (N_f)^{-0.12} + \epsilon_f^{0.6} (N_f)^{-0.6} \quad \dots\dots\dots (22)$$

式中：

- R_m ——材料的抗拉强度,单位为兆帕(MPa)；
- ϵ_f ——材料断裂真应变, $\epsilon_f = \ln \frac{100}{100-\phi}$ ；

- ψ ——材料的断面收缩率, %;
- E ——材料的弹性模量, 单位为兆帕(MPa);
- N_f ——裂纹萌生疲劳循环次数。

8.2.2.5 12Cr2MoG(T/P22)钢管的设计疲劳曲线见图 17。

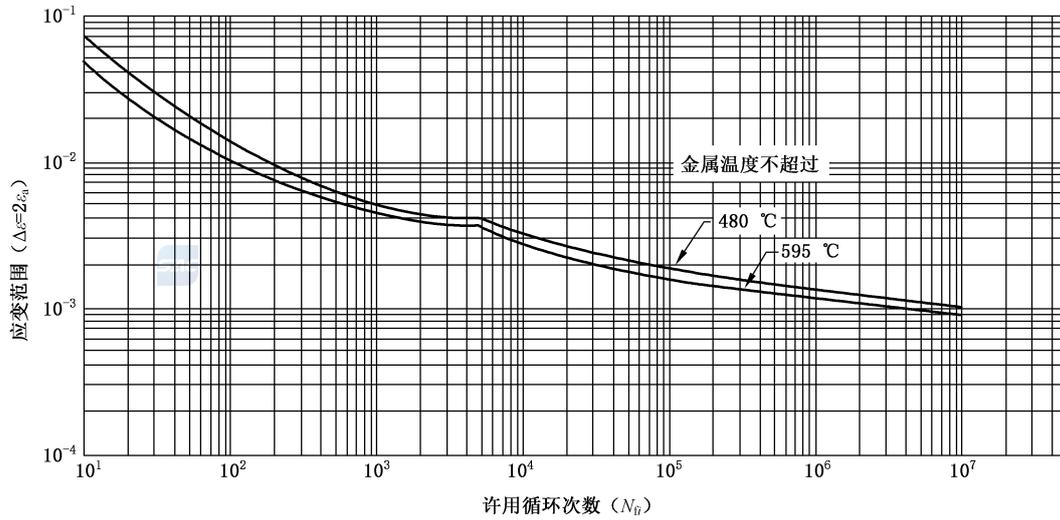


图 17 12Cr2MoG(T/P22)钢管的设计疲劳曲线

8.2.2.6 10Cr9Mo1VNbN(T/P91)钢的设计疲劳曲线见图 18。

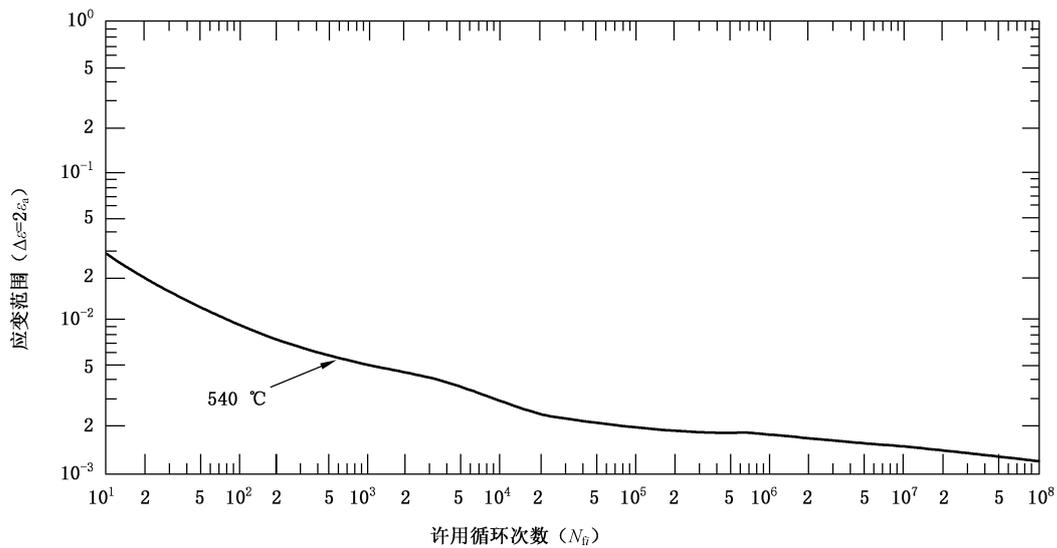


图 18 10Cr9Mo1VNbN(P91)钢的设计疲劳曲线

8.2.2.7 1Cr19Ni9(TP304)钢的设计疲劳曲线见图 19。

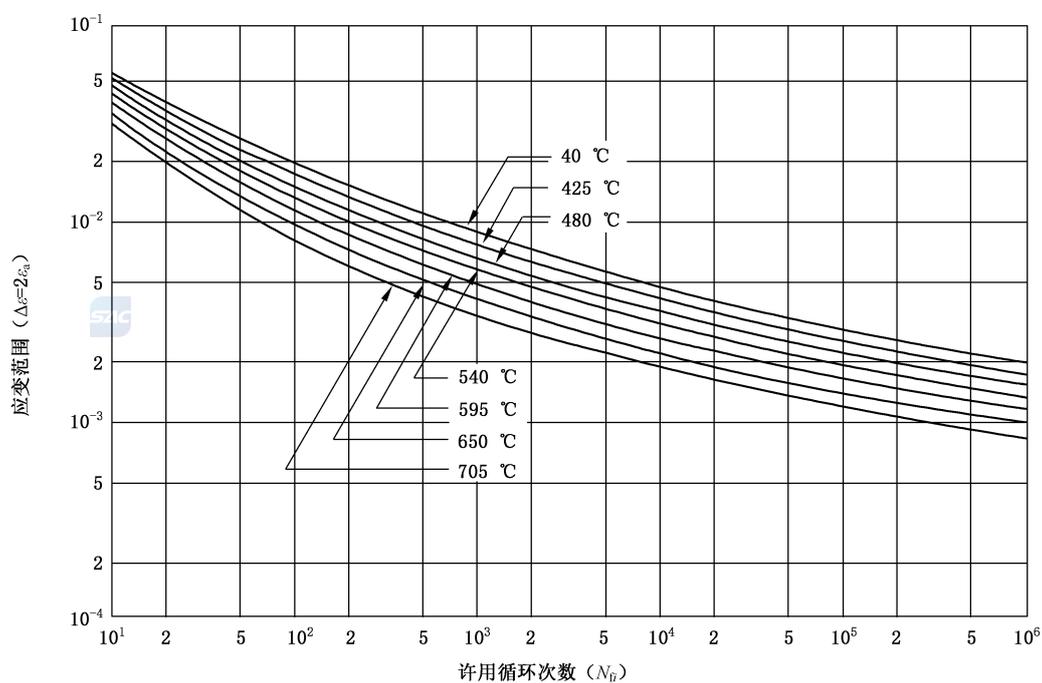


图 19 1Cr19Ni9(TP304)钢的设计疲劳曲线

8.2.2.8 0Cr17Ni12Mo2(TP316)钢的设计疲劳曲线见图 20。

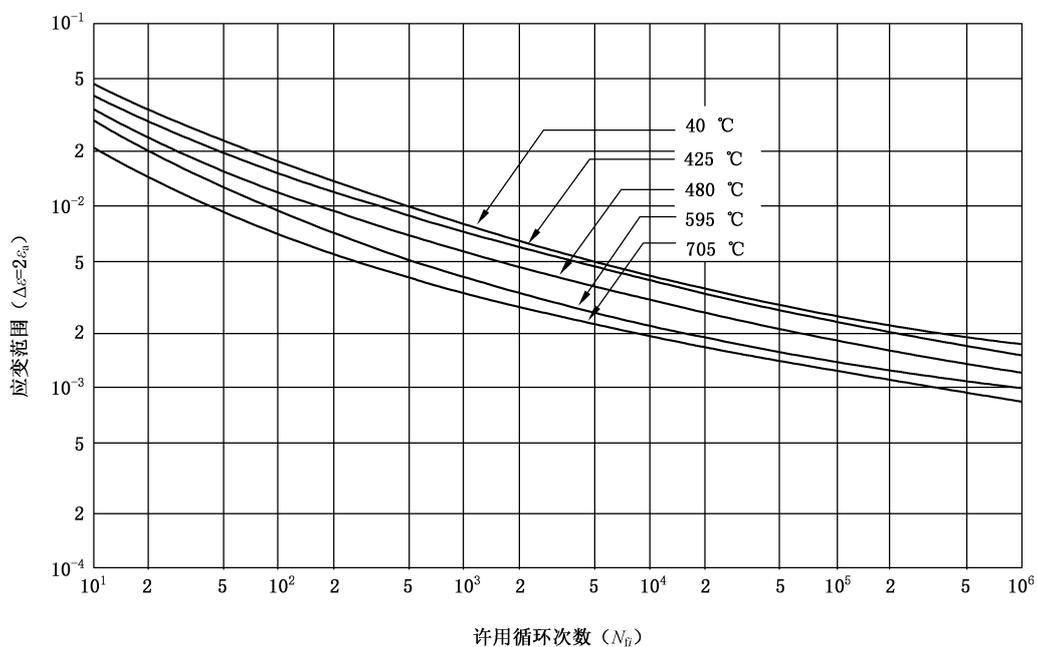


图 20 0Cr17Ni12Mo2(TP316)钢的设计疲劳曲线

8.2.3 危险部位的应力、应变分析

按 GB/T 16507.4 对部件危险部位的应力进行分析和计算,按 ASME BPVC-III/NH-2021 附录 T 对危险部位的应变进行计算和分析。

8.2.4 疲劳寿命估算

按计算的应力或应变确定引起疲劳破坏的应力幅(S_a)或应变范围 $[\Delta\epsilon(\Delta\epsilon = 2\epsilon_a)]$,然后由设计疲劳寿命曲线确定疲劳寿命。

8.2.5 安全系数

公式(18)的应力幅或公式(21)、公式(22)的应变幅取安全系数为 2,计算得出低周疲劳寿命(N_{f1});公式(18)、公式(19)、公式(21)或公式(22)的寿命取安全系数 20,计算得出低周疲劳寿命(N_{f2}),锅炉承压部件的低周疲劳寿命(N_f)按公式(23)计算。

$$N_f = \min(N_{f1}, N_{f2}) \quad \dots\dots\dots (23)$$

将 N_f 连成光滑曲线,则为设计的疲劳寿命曲线。

8.2.6 疲劳寿命评估

对只承受疲劳的锅筒、汽水分离器、低温集箱、再热蒸汽管道(冷段)、给水管道等承压部件,采用线性累积疲劳损伤法则评估其损伤度(D_2)按公式(24)计算。

$$D_2 = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{fi}} \quad \dots\dots\dots (24)$$

式中:

- n_i ——第 i 种工况下实际循环周次;
- N_{fi} ——第 i 种工况下部件的疲劳寿命,按 8.2 确定。

8.3 疲劳-蠕变交互作用下的寿命评估

8.3.1 对于承受疲劳-蠕变交互作用下的高温承压部件,如高温蒸汽管道、高温过热器集箱等部件,采用线性累积损伤法则评估疲劳-蠕变损伤,计算值应满足公式(25)。

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{fi}} + \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{t_{ri}} \leq D \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中:

- t_i ——承压部件在第 i 种应力与温度下的运行时间;
- t_{ri} ——承压部件在第 i 种应力与温度下的蠕变断裂时间,按 8.1 确定;
- n_i ——第 i 种工况下实际循环周次;
- N_{fi} ——第 i 种工况下部件的疲劳寿命,按 8.2 确定;
- D ——总疲劳-蠕变损伤界限值。

8.3.2 总疲劳-蠕变损伤界限值(D)与疲劳-蠕变损伤份额有关,12Cr2MoG(T/P22)、10Cr9Mo1VNbN(T/P91)、1Cr19Ni9(TP304)和 0Cr17Ni12Mo2(TP316)等四种锅炉钢的疲劳-蠕变交互作用曲线见图 21。

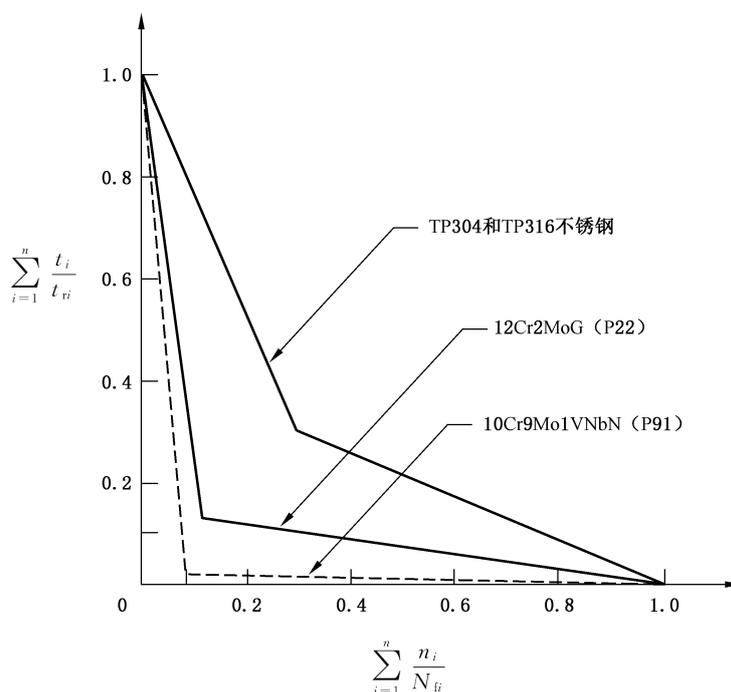


图 21 四种锅炉钢的疲劳-蠕变交互作用曲线

8.4 磨损损伤寿命评估

8.4.1 壁厚实测法

8.4.1.1 根据不同时间间隔测得的金属壁厚,评估部件中不同位置的管壁减薄率(C)按公式(26)计算。

$$C = \frac{W_1 - W_2}{H} \dots\dots\dots(26)$$

式中:

- C ——管壁减薄率,单位为毫米每小时(mm/h);
- W_1 ——前一时测得的金属壁厚,单位为毫米(mm);
- W_2 ——当前测得的金属壁厚,单位为毫米(mm);
- H ——两次测量的时间间隔,单位为小时(h)。

8.4.1.2 选取评估部件中最大的管壁减薄率(C_{\max}),部件的剩余寿命(t_{r1})按公式(27)计算。

$$t_{r1} = \frac{W_2(2[\sigma]_J - p) - p(d - 2W)}{C_{\max}(2[\sigma]_J - p)} \dots\dots\dots(27)$$

式中:

- t_{r1} ——部件剩余寿命,单位为小时(h);
- d ——部件原始外径,单位为毫米(mm);
- W ——部件原始壁厚,单位为毫米(mm);
- $[\sigma]_J$ ——材料的基本许用应力(按 GB/T 16507.4 确定),单位为兆帕(MPa);
- p ——部件内部压力,单位为兆帕(MPa)。

8.4.2 壁厚估算法

8.4.2.1 由于条件限制无法测量金属壁厚时,管壁减薄量(S)可按公式(28)估算。

$$S = A \times t_{op}^n \quad \dots\dots\dots (28)$$

式中：

- S ——由于磨损造成的管壁减薄量,单位为毫米(mm);
- A ——系数,与温度、材料等有关,在无法确定时,可取 5.0×10^{-3} ;
- t_{op} ——管子已运行时间,单位为小时(h);
- n ——系数,与材料有关,范围 $1/3 \sim 1$,在无法确定时,可取 0.5。

8.4.2.2 按公式(27)计算出部件的剩余寿命(t_{rl})。

8.5 烟气侧腐蚀损伤寿命评估

以烟气侧腐蚀损伤为主的电站锅炉承压部件,宜按 8.4 计算管壁减薄率确定部件的剩余寿命。

8.6 蠕变、烟气侧腐蚀和磨损共同作用下的承压部件寿命评估

8.6.1 承受蠕变、烟气侧腐蚀和磨损共同作用下的高温承压部件,如过热器和再热器管子,可按公式(29) 计算寿命。

$$t_{nr} = \frac{1}{k} \{1 - [1 + k(n - 1)t_r]^{1/n}\} \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$k = \frac{W - W_f}{W \times t_{op}} \quad \dots\dots\dots (30)$$

式中：

- t_{nr} ——管壁减薄速率(k)下的工作寿命,单位为小时(h);
- k ——管壁减薄速率,单位为毫米每小时(mm/h),按公式(30)计算;
- n ——应力指数, $n = 4 \sim 8$,一般取 4;
- t_r ——管壁不减薄下的蠕变断裂时间(参照 8.1 确定),单位为小时(h);
- W ——管壁初始厚度,单位为毫米(mm);
- W_f ——管壁最终厚度,单位为毫米(mm);
- t_{op} ——管子已运行时间,单位为小时(h)。

8.6.2 高温过热器和再热器管子的剩余寿命(t_{rl})可按公式(31)计算。

$$t_{rl} = t_{nr} - t_{op} \quad \dots\dots\dots (31)$$

9 寿命评估报告

寿命评估报告的主要内容应包括：

- a) 电站锅炉以及主要承压部件概况:包括机组和各承压部件参数、运行情况、事故情况、检修和检验情况等;
- b) 现状检查情况:结合基本资料,对各承压部件进行各项检测,并根据检测、试验结果提出承压部件寿命评估意见;
- c) 寿命评估采用的方法及结果分析:包括材料性能数据、应力、金属壁温等参数的获得方式,寿命评估采用的具体方法以及结果的综合分析;
- d) 寿命评估结论意见;
- e) 对电站锅炉继续使用的建议与监督措施:包括运行方式,参数限制,重点监督的部件及部位,再次进行寿命评定的预计时间等。

附录 A

(资料性)

电站锅炉承压部件的主要损伤模式

电站锅炉承压部件的主要损伤模式见表 A.1。

表 A.1 电站锅炉承压部件的主要损伤模式

部件名称		主要损伤模式				
		蠕变	疲劳	蠕变与疲劳	腐蚀	磨损
炉内承压部件	水冷壁	—	√	—	√	√
	省煤器	—	√	—	√	√
	过热器、再热器	√	√	√	√	√
炉外承压部件	锅筒、汽水分离器	—	√	—	√	—
	过热器集箱、再热器集箱	√	√	√	√	—
	水冷壁集箱、省煤器集箱	—	√	—	√	—
汽水管道	主蒸汽管道、再热蒸汽热段管道、导汽管	√	√	√	—	—
	再热蒸汽冷段管道、主给水管道、下降管	—	√	—	√	—

附录 B

(资料性)

电站锅炉常用耐热钢在不同状态下的 k 、 m 值

电站锅炉常用耐热钢在不同状态下的 k 、 m 值见表 B.1。

表 B.1 电站锅炉常用耐热钢在不同状态下的 k 、 m 值

材料	材料制造 国(厂)	工作参数		运行 时间 h	试验 温度 ℃	试样 数量 个	最长试验 点时间 h	系数 (k)	指数 (m)
		温度 ℃	压力 MPa						
12MX 主蒸汽母管直管段	苏联	510	9.8	169 461	510	8	5 837.5	253.5	-0.074 95
主蒸汽母管弯管段				255 756		6	>6 000	265.1	-0.071 39
主蒸汽母管直管纵向				255 756		9	15 066	275.5	-0.095 06
主蒸汽母管弯管纵向				261 032		4	8 379	278.0	-0.066 20
主蒸汽母管弯管横向				261 032		9	10 663	282.4	-0.068 01
12MX 原始段	苏联	510	9.8	0	510	9	4 143.8	496.4	-0.061 07
主蒸汽管监督段纵向				107 675		10	15 446.8	294.2	-0.072 00
主蒸汽管监督段横向				107 675		7	5 681.6	282.2	-0.065 14
主蒸汽管监督段焊缝				107 675		8	4 888	279.3	-0.078 98
主蒸汽母管弯头				90 329		8	3 119.8	301.2	-0.047 02
主蒸汽母管直管段				13 700		10	3 268.7	273.2	-0.079 22
12MX 主蒸汽管弯 管外弧纵向	苏联	510	9.9	207 512.9	510	9	5 960.6	292.9	-0.104 58
主蒸汽管弯管外弧横向					510	8	14 956.5	238.8	-0.080 74
主蒸汽变管外弧横向					540	7	5 012.5	266.3	-0.123 20
主蒸汽管段直段横向					510	10	7 831.7	305.6	-0.099 30
15123.9 主蒸汽管直管段	捷克	540	9.4	125 000	540	7	11 389	302.9	0.076 53
主蒸汽管焊缝		—	—	—	—	8	8 173	269.9	-0.082 51
主蒸汽管弯管		540	9.4	165 000	540	9	9 416.5	257.5	-0.077 85
15123.9 主蒸汽管 监督段纵向		540	9.8	137 604	540	11	>16 056	251.4	-0.059 72
主蒸汽监督段横向						6	7 471.1	316.6	-0.038 02
主蒸汽管焊缝						10	3 862.4	270.1	-0.092 02
主蒸汽弯管纵向						10	9 156.2	255.4	-0.070 19
10CrMo910 主蒸汽监督段	西德	540	9.8	35 132	540	8	3 993	252.9	-0.090 07
主蒸汽管焊缝						8	4 788.5	253.5	-0.091 94

表 B.1 电站锅炉常用耐热钢在不同状态下的 k 、 m 值 (续)

材料	材料制造 国(厂)	工作参数		运行 时间 h	试验 温度 ℃	试样 数量 个	最长试验 点时间 h	系数 (k)	指数 (m)
		温度 ℃	压力 MPa						
10CrMo910 主蒸汽监督段	西德	540	9.8	101 557.4	540	6	>10 000	246.7	-0.108 32
					560	6	>10 000	205.9	-0.102 93
10CrMo910 主蒸汽直管段 主蒸汽弯管段	西德	540	9.8	106 000	540	10	16 529	227.4	-0.010 35
						10	14 188.4	237.4	-0.102 84
10CrMo910 主蒸汽母管 主蒸汽管焊缝	西德	540	9.8	106 592	540	5	8 277	226.1	-0.091 40
						9	6 488.5	176.0	-0.055 31
12Cr1MoV 主蒸汽管道 监督段	苏联	540	9.8	54 849	540	12	>7 071	292.6	-0.095 24
				106 000		20	7 071	234.0	-0.064 21
12Cr1MoV 主蒸汽管监督段 主蒸汽管弯头 炉侧主蒸汽管道 机侧主蒸汽管道	苏联	510	9.8	90 000	540	7	4 517	238.5	-0.069 18
				110 660		8	2 614.3	234.1	-0.067 47
				140 690		8	12 343.6	225.6	-0.058 35
				170 548		7	18 024.2	248.5	-0.061 42
12Cr1MoV 主蒸汽管 监督段	苏联	540	9.8	101 794	540	9	4 634.2	227.1	-0.062 16
				154 539		7	6 048.3	234.1	-0.067 52
12Cr1MoV 主蒸汽管监督段 主蒸汽管焊缝	苏联	540	9.8	153 291	540	7	10 395	146.5	-0.039 54
						8	>13 428	250.9	-0.110 0
12Cr1MoV 原始段	日本川崎 钢铁公司	—	—	0	510	6	6 164	478.7	-0.103 20
					540	5	6 007.4	389.8	-0.105 21
					570	6	8 422	277.2	-0.093 40
12Cr1MoV 钢管原始段心部 原始段外壁 原始段内壁 12Cr1MoV 钢管原始段心部 原始段外壁 原始段内壁	西德	—	—	0	540	10	9 723.4	418.9	-0.127 035
						6	10 138.6	395.1	-0.095 16
						6	11 090.8	401.8	-0.099 77
						8	12 618.2	472.5	-0.131 173
						8	14 882.6	395.4	-0.106 586
						8	10 321.8	458.7	-0.124 850
12Cr1MoV 钢管原始段心部	西德	—	—	0	580	7	7 027.8	276.2	-0.110 678
					610	7	4 266.1	227.8	-0.120 70
12Cr1MoV 钢管原始段心部	西德	—	—	0	580	7	4 978.7	337.7	-0.137 440
					610	7	3 422.2	259.8	-0.145 647
12Cr1MoV 高温过热器管	西德	540	9.02	106 728	570	8	2 256	141.9	-0.066 15
T91-T9 焊接原始管 ^a	日本川崎 钢铁公司	—	—	0	630	7	>16 000	256.0	-0.109 723

表 B.1 电站锅炉常用耐热钢在不同状态下的 k 、 m 值 (续)

材料	材料制造 国(厂)	工作参数		运行 时间 h	试验 温度 ℃	试样 数量 个	最长试验 点时间 h	系数 (k)	指数 (m)
		温度 ℃	压力 MPa						
T91-G102 对接焊原始管	日本川崎 钢铁公司	—	—	0	610	5	<11 000	281.0	-0.098 84
P91 原始管	—	—	—	0	550	—	—	258.5	-0.052 2
	—	—	—		575	—	—	270.1	-0.084 4
P91 母材	—	565	13.7	30 000	565	8	4 376	323.5	-0.069 9
P91 焊接接头原始管焊后 760 ℃保温 2 h 炉冷	—	—	—	0	550	—	—	251.0	-0.056 4
	—	—	—		575	—	—	231.3	-0.072 6
P91 焊接接头原始管焊后 780 ℃保温 1.5 h 自冷	—	565	13.7	30 000	565	7	8 024	294.9	-0.075 4
P91 焊接接头原始管焊后 760 ℃保温 6 h 炉冷	—	—	—	—	565	—	4 109	315.0	-0.067 2
X20CrMoWV121	—	—	—	—	540	13	6 133	363.3	-0.065 9
	—	—	—	—	555	11	3 145	319.8	-0.065 7
	—	—	—	—	570	18	7 858	288.7	-0.070 6
P92 原始管 $\phi 315 \times 40$ mm	日本新日 铁公司	—	—	0	600	9	34 639	297.9	-0.079 5
		—	—	0	650	9	45 656	400.4	-0.175 3
P92 原始管 $\phi 318.5 \times 50$ mm	日本新日 铁公司	—	—	0	600	10	49 159	309.8	-0.083 3
		—	—	0	650	10	55 123	187.8	-0.092 8
P92 原始管 $\phi 323 \times 60$ mm	法国 V&M 公司	—	—	0	600	8	57 042	348.9	-0.100 1
		—	—	0	650	8	57 715	408.2	-0.177 1

^a 为爆管试验结果。

附录 C

(资料性)

电站锅炉常用耐热钢的低周疲劳参数

电站锅炉常用耐热钢的低周疲劳参数见表 C.1。

表 C.1 电站锅炉常用耐热钢的低周疲劳参数

材料	热处理工艺	试验温度 ℃	R_{el} ($R_{p0.2}$) MPa	R_m MPa	σ'_t/E	σ'_t MPa	b	ϵ'_t	c	试验条件
19Mn5	920℃正火 620℃回火	20	337	520	0.004 38	880	-0.092 0	0.396 0	-0.552 0	Z向, $r=-1, \Delta, N_f$
BHW35	920℃正火 630℃回火	20	—	647	0.005 12	1 019	-0.078 2	0.328 8	-0.565 0	$f=(0.05 \sim 0.887)$ Hz
BHW35 (焊缝)	920℃正火 630℃回火	20	—	653	0.006 32	1 170	-0.105 0	0.111 1	-0.460 0	D向, $r=-1, \Delta, N_f$ $f=(0.083 \sim 0.666 7)$ Hz
15CrMo	—	20	—	455	0.004 87	962	-0.110 0	0.399 0	-0.530 0	Z向, $r=-1, \Delta, N_f$ $f=(0.125 \sim 1.39)$ Hz
SA299	锻件正火	25	315	540	0.001 8	—	-0.068 2	0.190 3	-0.518 4	Z向, $r=-1, \Delta, N_f$ $f=(0.3 \sim 0.5)$ Hz
12Cr1MoV	正火+回火	20	375	509	0.003 45	—	-0.067 8	0.611 4	-0.638 9	Z向, $r=-1, \Delta, N_f$ $f=(0.1 \sim 0.625)$ Hz
20	热轧	20	—	430	—	980	-0.120 0	0.360 0	-0.540 0	—
10Cr Mo910	运行 10.8 万 h 的主蒸汽 管道材料	20	294	520	—	—	—	—	—	Z向, $r=-1, \Delta, N_f$
		540	201	334	0.002 70	452	-0.087 8	0.139 8	-0.470 8	$f=(0.28 \sim 2.45)$ Hz
16MnR	焊缝区	20	385 (母板)	588 (母板)	0.005 97	—	-0.072 5	0.838 0	-0.615 0	D向, $r=-1, \Delta, N_{20}$
	熔合区				0.006 80	—	-0.101 0	1.906 0	-0.758 0	
P91 母材	正火+回火	20	550	670~ 685	0.005 9	—	-0.097 2	1.325	-0.774 0	Z向, $r=-1, \Delta, N_f$ $\epsilon=4 \times 10^{-3}/s$
		550	365	410	0.003 72	—	-0.079 6	1.252	-0.787	
		575	350	375	0.002 29	—	-0.062 5	1.098	-0.788	

表 C.1 电站锅炉常用耐热钢的低周疲劳参数 (续)

材料	热处理工艺	试验温度 ℃	R_{eL} ($R_{p0.2}$) MPa	R_m MPa	σ'_f/E	σ'_f MPa	b	ϵ'_f	c	试验条件
P91 焊接接头	焊后 760 °C 保温 2 h 炉冷	20	453	660~ 700	0.005 4	—	-0.097	3.426 4	-0.867 5	Z 向, $r = -1, \Delta, N_f$ $\epsilon = 4 \times 10^{-3} / s$
		550	330	375	—	—	-0.053 1	1.221	-0.764	
		575	310	335	—	—	-0.062 8	1.753	-0.806	

注：Z 向——轴向应变控制；
 D 向——径向应变控制；
 Δ ——三角波加载；
 r ——应变比 ($r = \epsilon_{\min} / \epsilon_{\max}$)；
 f ——频率；
 N_f ——破断循环周次；
 N_{20} ——稳定拉伸载荷下降 20% 时的循环周次。

