

ICS 27.100

F 23

备案号: 15339-2005

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 940 — 2005

火力发电厂蒸汽管道寿命评估技术导则

The technical guide for the life assessment of steam pipe
in fossil fuel power plant

2005-02-14 发布

2005-06-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

目 次

前言	· II
1 范围	· 1
2 规范性引用文件	· 1
3 管道寿命评估和强度校核的条件	· 1
4 管道寿命评估	· 2
5 寿命评估技术方法	· 4
6 寿命评估报告	· 7
附录 A (资料性附录) (9~12) Cr-1Mo 钢的 k 、 m 值和 $L-M$ 参数曲线	· 8
附录 B (资料性附录) 评估管道蠕变寿命的 θ 法	· 10
附录 C (资料性附录) 常用蒸汽管道钢的低周疲劳性能参数	····· · 12
附录 D (资料性附录) 主蒸汽管道寿命评估举例	· 13

前 言

本标准是根据原国家经济贸易委员会《关于确认 1999 年度电力行业标准制、修订计划项目的通知》（电力〔2000〕22 号文）的安排而制定的。

蒸汽管道是火电机组关键部件之一，长期在高温、高压下服役会产生蠕变损伤。蒸汽管道材料的微观组织随着运行时间的延长而老化，伴随着材料微观组织的老化引起材料强度的劣化，对于调峰机组伴随着机组的频繁启停还会产生疲劳损伤。故蒸汽管道的安全运行在火电机组安全运行中具有重要的意义。

我国目前还有已投运 45 年的机组在运行。超过 30 年的老旧机组除少量作退役报废处理外，大部分仍在继续运行，蒸汽管道的老化问题和运行风险日益突出。因此，对蒸汽管道的剩余寿命进行评估，是保证老旧机组安全运行的重要措施。

本标准依据我国电站金属材料工作者几十年来积累的对蒸汽管道寿命评估的经验，参照 DL/T 654—1998《火电厂超期服役机组寿命评估技术导则》中有关条款，国外有关蒸汽管道寿命评估方法和有关标准，提出了我国火力发电厂蒸汽管道寿命评估的基本步骤、常用的评估方法，一方面为蒸汽管道的延寿运行提供技术上的依据，另一方面可充分发挥蒸汽管道的运行潜力。

本标准主要针对在役机组的蒸汽管道的剩余寿命评估，但其评估方法亦可为新机组蒸汽管道的选材、运行寿命的校核所参考。对于新建机组，应注意蒸汽管道设计、制造、监造、安装、运行、检修及改造等技术资料的收集保存，以便为以后的蒸汽管道寿命评估提供完整的资料和可靠的依据。

本标准附录 A、附录 B、附录 C、附录 D 是资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电站金属标准化技术委员会归口并解释。

本标准起草单位：西安热工研究院有限公司、西北电力试验研究院。

本标准主要起草人：李益民、杨百勋、贾建民、严苏星、刘树涛、史志刚。

火力发电厂蒸汽管道寿命评估技术导则

1 范围

本标准规定了火力发电厂蒸汽管道的寿命评估的基本原则、基本步骤、所需的信息资料，推荐了常用的寿命评估方法。

本标准适用于火力发电厂蒸汽温度高于 400℃ 的主蒸汽管道、再热蒸汽管道及锅炉、汽轮机导汽管的寿命评估，蒸汽温度高于 400℃ 的联箱可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 228 金属材料 室温拉伸试验方法
 GB/T 229 金属夏比缺口冲击试验方法
 GB/T 2039 金属拉伸蠕变及持久试验方法
 GB/T 9222—1988 水管锅炉受压元件强度计算
 GB/T 13298 金属显微组织检验方法
 GB/T 15248 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法
 DL 438—2000 火力发电厂金属技术监督规程
 DL/T 441—2004 火力发电厂蒸汽管道蠕变监督规程
 DL/T 551 低合金耐热钢蠕变孔洞检验技术工艺导则
 DL/T 652 金相复型技术工艺导则
 DL/T 654—1998 火电厂超期服役机组寿命评估技术导则
 DL/T 674 火电厂用 20 号钢珠光体球化评级标准
 DL/T 773 火电厂用 12Cr1MoV 钢球化评级标准
 DL/T 786 碳钢石墨化检验及评级标准
 DL/T 787 火力发电厂用 15CrMo 钢珠光体球化评级标准
 DL/T 818 低合金耐热钢碳化物相分析技术导则
 DL/T 820 管道焊缝超声波检验技术规程
 DL/T 821 钢制承压管道对接焊接接头射线检验技术规程
 DL/T 5054 火力发电厂汽水管道设计技术规定
 JB 4730 压力容器无损检验

3 管道寿命评估和强度校核的条件

依据下述情况分别对蒸汽管道进行寿命评估和强度校核：

- a) 已运行 20 万 h（含 20 万 h）以上的带基本负荷的火电机组，应进行寿命评估。
- b) 对于曾提高参数（相对于设计参数）运行的机组，进行寿命评估的时间应适当提前。
- c) 对于设计的调峰机组，当超过设计循环周次后，应进行低周疲劳—蠕变寿命评估；对由基本负荷机组改造为调峰机组或启停频繁的机组，也应进行低周疲劳—蠕变寿命评估。

- d) 工作温度大于或等于 450℃ 的碳钢 (20G)、钼钢 (0.5Mo) 蒸汽管道, 当出现下列情况之一时, 应进行寿命评估:
- 1) 运行时间大于或等于 15 万 h。
 - 2) 珠光体球化达到 5 级。珠光体球化评级按 DL/T 674 执行。
 - 3) 石墨化达到 3 级。石墨化评级按 DL/T 786 执行。
- e) 12CrMo、15CrMo、12CrMoV 和 12Cr1MoV 钢制蒸汽管道, 即使运行时间未达到 20 万 h, 当出现下列情况之一时, 应进行寿命评估:
- 1) 相对最大蠕变应变大于或等于 0.75% 或最大蠕变速率大于或等于 $0.35 \times 10^{-7}/\text{h}$ 。蠕变测量按 DL/T 441 执行。
 - 2) 监督段中碳化物内钼含量占钢中钼总含量的比值: 12CrMo 和 15CrMo 大于或等于 85%, 12Cr1MoV 大于或等于 75%。碳化物中钼的测量按 DL/T 818 执行。
 - 3) 监督段金相组织中珠光体球化达到 5 级。15CrMo 和 12Cr1MoV 钢的珠光体球化级别分别按 DL/T 787 和 DL/T 773 执行。
- f) 除 3 中 e) 所述的钢种外, 其他合金钢蒸汽管道长期运行后, 当相对蠕变应变达到 1.0% 或最大蠕变速率大于 $1.0 \times 10^{-7}/\text{h}$ 时, 应进行寿命评估。
- g) 管道的实测壁厚小于取用壁厚时, 应进行壁厚强度校核。
- h) 管道存在体积型超标缺陷时, 首先应进行消缺处理; 若消缺难度大或生产上暂时不具备消缺条件, 应用断裂力学方法对缺陷进行安全性评定。焊缝超标缺陷评定方法按 DL/T 654—1998 中 5.4。

4 管道寿命评估

4.1 评估资料

4.1.1 设计、运行及检修资料

- a) 管道设计资料, 包括蒸汽参数、设计依据、部件材料及其力学性能、制造工艺、结构几何尺寸、强度计算书及管道的冷紧位置、冷紧方向和预拉紧力等。
- b) 管道安装资料, 包括光谱检测、焊接及热处理工艺、主要缺陷的处理记录等。
- c) 管道投运时间、运行小时数和启停次数。
- d) 管道实际运行压力、温度及压力、温度的波动范围; 超设计参数运行的温度、压力及每一参数下的累积运行时间。
- e) 管道事故记录和事故分析报告。
- f) 管道焊缝的挖补修复与弯头 (弯管)、阀门及三通的更换记录。
- g) 管道历次检修检查记录, 包括管道外观检查、壁厚和弯头不圆度测量及蠕胀测量记录, 焊缝、弯头 (弯管) 的无损检验, 材料成分的校对、金相组织、硬度检查, 腐蚀状况检查和管系的支吊检查记录等。

4.1.2 管道材料性能数据

根据机组的运行方式, 确定对蒸汽管道是进行蠕变寿命评估、疲劳—蠕变交互作用寿命评估还是焊缝缺陷的安全性评定, 不同类型的评估所需的材料性能数据如下。

- a) 管道蠕变寿命评估所需的材料性能数据:
 - 1) 常规力学性能。包括室温和工作温度下的拉伸性能、冲击性能, 硬度。
 - 2) 高温长期性能。包括持久强度、蠕变极限、最小蠕变速率。
 - 3) 微观组织与碳化物特性。微观组织包括组织特征、晶粒度、表面脱碳、珠光体球化级别、石墨化级别 (碳、钼钢)、蠕变孔洞和裂纹; 碳化物特性包括碳化物成分与结构。
 - 4) 物理性能。包括氧化速率和腐蚀速率。
- b) 管道蠕变—疲劳交互作用寿命评估所需的材料性能数据:

- 1) 常规力学性能。包括室温和工作温度下的拉伸、冲击性能, 硬度。
- 2) 高温长期性能。包括持久强度、蠕变极限、最小蠕变速率, 低周疲劳性能, 疲劳—蠕变交互作用曲线。
- 3) 微观组织与碳化物特性。微观组织包括组织特征、晶粒度、表面脱碳、珠光体球化级别、石墨化级别(碳、铝钢)、蠕变孔洞和裂纹; 碳化物特性包括碳化物成分与结构。
- 4) 物理性能。包括弹性模量、泊松比, 线膨胀系数、比热容、热导率, 氧化速率和腐蚀速率。

4.2 应力计算

4.2.1 内压应力计算

a) 蒸汽管道直管段的内压折算应力按式(1)计算, 或采用式(2)计算环向应力 σ_θ 。

$$\sigma_{eq} = \frac{p[0.5D_o - Y(S - \alpha)]}{S - \alpha} \quad (1)$$

式中:

σ_{eq} ——内压折算应力, MPa;

p ——管道正常运行下的压力, MPa;

D_o ——蒸汽管道外径, mm;

S ——蒸汽管道壁厚, mm;

α ——考虑腐蚀、磨损和机械强度的附加壁厚, mm;

Y ——温度对计算管子壁厚公式的修正系数(对于碳钢、低合金钢和高铬钢, 480℃及以下时 $Y=0.4$, 510℃时 $Y=0.5$, 538℃及以上时 $Y=0.7$, 中间温度的 Y 值, 可按内插法计算)。

$$\sigma_\theta = \frac{p(D_o - S)}{2S} \quad (2)$$

式中:

σ_θ ——环向应力, MPa。

b) 弯头部位的最大环向应力按下式计算:

$$\sigma_{\theta\max} = \frac{pD_i}{2S} \left[1 + \frac{3D_i e}{2S} \cdot \frac{1}{1 + p \left(\frac{1-\nu^2}{2E} \right) \left(\frac{D_i}{S} \right)^3} \right] \quad (3)$$

$$e = \frac{D_{o\max} - D_{o\min}}{D_{nom}}$$

式中:

$\sigma_{\theta\max}$ ——最大环向应力, MPa;

e ——弯头不圆度;

p ——管道正常运行下的压力, MPa;

$D_{o\max}$ 、 $D_{o\min}$ ——蒸汽管道外直径的最大、最小值, mm;

D_{nom} ——管道的公称外直径;

S ——弯头(弯管)的最小壁厚, mm;

ν ——泊松比, 0.3;

E ——材料弹性模量, MPa;

D_i ——管道内直径, mm。

4.2.2 热应力计算

对管道进行蠕变—疲劳寿命评估时, 蒸汽管道的环向热应力按下式计算:

$$\sigma_h = \frac{E\alpha|\Delta T|}{f(1-\nu)} \quad (4)$$

式中：

α ——材料的线胀系数， $1/K$ ；

ΔT ——蒸汽管道内外壁温差， $^{\circ}C$ ；

ν ——泊松比，0.3；

f ——与管道内外壁厚有关的结构系数，可查 GB/T 9222—1988 中附录 D 的图 D.3。

4.3 寿命评估的程序和步骤

4.3.1 寿命评估的程序

寿命评估的程序按 DL/T 654—1998 中的 4.3 执行。

4.3.2 管道寿命评估的步骤

管道寿命评估的步骤采用三级评估法。

a) I 级评估——基本评估。

b) II 级评估——较精确评估。当 I 级评估的蒸汽管道寿命小于蒸汽管道已运行的时间时，进行 II 级评估。

c) III 级评估——精确评估。当 II 级评估的蒸汽管道寿命小于蒸汽管道已运行的时间时，进行 III 级评估。

4.3.3 三个等级评估所需资料（见表 1）

表 1 三个等级评估所需资料

	I 级评估	II 级评估	III 级评估
设计、制造和安装资料	电厂记录	电厂记录	电厂记录
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
管道状态检测	实际测量直管和弯头（弯管）壁厚、弯头不圆度、焊缝和弯头（弯管）的微观组织及硬度、焊缝和弯头（弯管）无损检测	实际测量直管和弯头（弯管）壁厚、弯头不圆度、焊缝和弯头（弯管）的微观组织及硬度、焊缝和弯头（弯管）无损检测	实际测量直管和弯头（弯管）壁厚、弯头不圆度、焊缝和弯头（弯管）的微观组织及硬度、碳化物成分与结构、焊缝和弯头（弯管）无损检测
直管段应力	计算分析	计算分析	计算分析
弯头应力	经验公式计算	经验公式或有限元计算或试验应力测量	经验公式或有限元计算或试验应力测量
材料性能及微观组织损伤状态	材料性能查阅资料取最低值	割管取样进行拉伸、冲击、硬度和微观组织检查，持久、蠕变性能查阅资料取最低值	割管取样进行拉伸、冲击、硬度试验、微观组织和碳化物检查、进行持久断裂或蠕变断裂试验

4.3.4 管道检测与材料试验方法

焊缝和弯头（弯管）无损检测按 JB 4730 或 DL/T 820 及 DL/T 821 执行；材料微观组织检查按 GB/T 13298 和 DL/T 652 执行；材料的持久、蠕变性能按 GB/T 2039 执行；碳化物检查和蠕变孔洞检查分别按 DL/T 818 和 DL/T 551 执行。拉伸、冲击试验分别按 GB/T 228 和 GB/T 229 执行。

5 寿命评估技术方法

5.1 等温线外推法

a) 试验温度选与蒸汽管道运行相同条件下的温度，按 GB/T 2039 进行材料的持久断裂试验。

b) 利用下式对试验数据用最小二乘法进行拟合, 确定 k 、 m 值:

$$\sigma = k(t_r)^m \quad (5)$$

式中:

σ ——试样加载的应力水平, MPa;

t_r ——断裂时间, h;

k 、 m ——由试验确定的材料常数。

几种低合金耐热钢在不同状态下的 k 、 m 值可参照 DL/T 654—1998 中的附录 A。(9~12) Cr-1Mo 钢的 k 、 m 值参见附录 A 中表 A.1。

c) 用式 (5) 外推材料某一规定时间的持久强度 σ_t^T 时, 外推的规定时间应小于最长试验点时间 10 倍。如外推材料 540℃、10 万 h 的持久强度, 则最长试验点时间应大于 10000h。

d) 拟合下限寿命线的 k' 和 m' 值, 取下限寿命线的应力 σ 为中值寿命线应力 σ 的 0.8 倍。

e) 焊缝材料的持久强度 σ_{tw}^T 按下式确定:

$$\sigma_{tw}^T = 0.8R\sigma_t^T \quad (6)$$

式中:

σ_t^T ——由试验外推的母材持久强度, MPa;

R ——焊缝持久强度减弱系数。

对于低合金耐热钢, 可按照表 2 选取焊缝持久强度减弱系数。

表 2 低合金耐热钢的焊缝持久强度减弱系数

温度 ℃	10h	30h	100h	300h	1kh	3kh	1 万 h	3 万 h	10 万 h	30 万 h
399~454	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
482	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
510	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.96
538	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.96	0.93
566	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.95	0.91	0.87
593	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.94	0.90	0.86	0.81
621	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.94	0.89	0.85	0.79	0.74
649	1.00	1.00	1.00	0.98	0.93	0.89	0.83	0.78	0.71	0.66

f) 确定直管段的内压折算应力或环向应力及弯头的最大内压应力 $\sigma_{\theta\max}$ 。

g) 按下式计算蒸汽管道的蠕变寿命 (h):

$$\lg \frac{t}{10^5} = \frac{\lg \frac{\sigma'_{10^5}}{n\sigma_{\theta\max}}}{\lg \frac{\sigma'_{10^4}}{\sigma'_{10^5}}} \quad (7)$$

式中:

σ'_{10^4} 、 σ'_{10^5} ——某一温度下 10^4 h 和 10^5 h 的持久强度;

n ——应力系数，当选中值寿命线时， n 取 1.5，当选下限线时， n 取 1.2。

h) 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，蒸汽管道失效，蒸汽管道的累积蠕变损伤按下式计算：

$$\sum_{i=1}^l \frac{t_i}{t_n} \leq 1 \quad (8)$$

式中：

t_i ——蒸汽管道在某一应力、温度下的运行时间；

t_n ——蒸汽管道在某一应力、温度下的失效时间。

对于蒸汽管道运行过程的温度偏离设计值，可用等效使用期限方法来推算，表 3 列出了珠光体耐热钢的等效使用期限折算系数。

表 3 珠光体耐热钢的等效使用期限折算系数

温 度 ℃	低碳钢	铬钼钢	铬钼钒钢
430			
440			
443	0.222		
444	0.476		
445	0.596		
450	0.6413		
455	0.692		
460	1.000		
465	1.485		
470	2.06		
525	3.027	0.300	0.282
530	4.160	0.448	0.435
533		0.629	0.561
534		0.637	0.609
535		0.667	0.658
540		1.000	1.000
545		1.483	1.557
550		2.184	2.251
555		3.216	3.356
560		4.702	4.975

注：黑体带杠的数字为标准值。以 12Cr1MoV 钢为例，计算温度为 540℃，当超过 10℃时，每运行 1h，相当于在 540℃下运行 2.251h；当低于 10℃时，每运行 1h，相当于在 540℃下运行 0.435h

5.2 $L-M$ 参数法

- a) 材料的持久试验按 GB/T 2039 执行， $L-M$ 参数评估方法见 DL/T 654—1998 中的 5.1.2；
- b) 2.25Cr-1Mo (10CrMo910、P22)、12Cr1MoV 钢的 $L-M$ 参数曲线见 DL/T 654—1998 中的 5.1.2；
- c) P91、P92 钢的 $L-M$ 参数曲线参见附录 A 中图 A.1 和图 A.2。

5.3 θ 法

评估管道蠕变寿命的 θ 法参见附录 B。

5.4 材料微观组织老化及蠕变孔洞的评定

根据管道材料的力学性能和管道的运行参数,利用适当的评估方法对管道寿命作出定量计算后,还需结合材料的微观组织老化程度、碳化物成分和结构及蠕变孔洞的评定,对管道的蠕变寿命作出综合评估。材料微观组织的老化程度、碳化物成分和结构及蠕变孔洞的评定按下述条款执行。

- a) 管道的微观金相组织检验按 DL/T 652 或 GB/T 13298 执行;
- b) 管道材料的蠕变孔洞检查按 DL/T 551 执行;
- c) 对于碳钢和钼钢,主要检测其珠光体球化、石墨化和晶界孔洞;
- d) 对于低合金耐热钢,主要检测其珠光体球化和晶界孔洞;
- e) 对于 (9~12) Cr-1Mo 钢,主要检测马氏体板条的分解程度、亚晶尺寸、晶界碳化物和 Laves 相的数量、分布和形态;
- f) 蠕变孔洞的评定按 DL 438—2000 附录 C 中的表 C 执行;
- g) 对碳化物分析结果,根据 DL 438 和 DL/T 818 作出评估。

5.5 管道的疲劳—蠕变交互作用寿命评估

- a) 管道的疲劳—蠕变交互作用寿命评估方法见 DL/T 654—1998 中的 5.3;
- b) 材料的低周疲劳特性可查阅资料或按 GB/T 15248 执行,几种蒸汽管道钢的低周疲劳特性参数参见附录 C。
- c) 2.25Cr-1Mo (10CrMo910、P22) 和 12Cr1MoV 钢的疲劳—蠕变交互作用曲线见图 1。

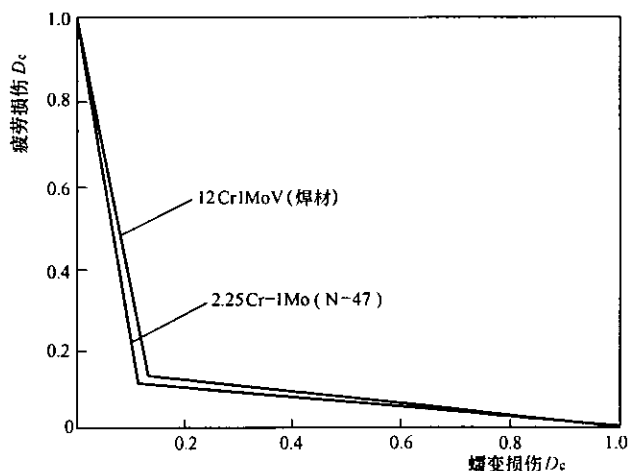


图 1 2.25Cr-1Mo (10CrMo910、P22) 和 12Cr1MoV 钢的疲劳—蠕变交互作用曲线

6 寿命评估报告

寿命评估报告的主要内容包括:

- a) 机组及蒸汽管道概况;
- b) 蒸汽管道的各项检测、试验结果与状态评估意见;
- c) 蒸汽管道的应力分析结果;
- d) 寿命评估采用的材料性能数据、评估方法和评估结果。

主蒸汽管道寿命评估的案例参见附录 D。

附 录 A
(资料性附录)

(9~12) Cr-1Mo 钢的 k 、 m 值和 L — M 参数曲线

A.1 (9~12) Cr-1Mo 钢的 k 、 m 值

(9~12) Cr-1Mo 钢的 k 、 m 值见表 A.1。

表 A.1 (9~12) Cr-1Mo 钢不同状态下的 k 、 m 值

材料	材料状态	$R_{P0.2}(\sigma_{0.2})$ MPa	$R_m(\sigma_b)$ MPa	硬度 HB	试验温度 ℃	试样 个数	最长试验 点时间 h	系数 k	指数 m
P91 母材	正火+回火	550	670~685		室温			—	—
		365	410		550			258.5	-0.0522
		350	375		575			270.1	-0.0844
P91 焊 接头	焊后 760℃保温 2h 炉冷	453	660~700		室温			—	—
		330	375		550			251.0	-0.0564
		310	335		575			231.3	-0.0726
P91 母材 ^a	正火+回火	510	682	217	室温			—	—
		370	410	—	565	8	4376	323.5	-0.0699
P91 焊 接头 ^a	焊后 780℃保温 1.5h 自冷	492	670	274	室温			—	—
		357	385	—	565	7	8024	294.9	-0.0754
	焊后 780℃保温 1.5h 自冷	422	625	200	室温			—	—
		260	335	—	565	8	9150	263.6	-0.0923
	焊后 760℃保温 6h 炉冷	536	661	220	室温			—	—
F11	正火+回火	357	402		565		4109	315.0	-0.0672
		502	745		室温			—	—
		282	400		540	13	6133	363.3	-0.0659
		260	370		555	11	3145	319.8	-0.0657
		251	348		570	18	7858	288.7	-0.0706

a 试验母材和焊接接头在 565℃、13.7MPa 下运行约 30000h；持久强度外推公式： $\sigma = k(t_r)^m$

A.2 P91 和 P92 钢的 L — M 参数曲线

P91 和 P92 钢的 L — M 参数曲线见图 A.1 和图 A.2。

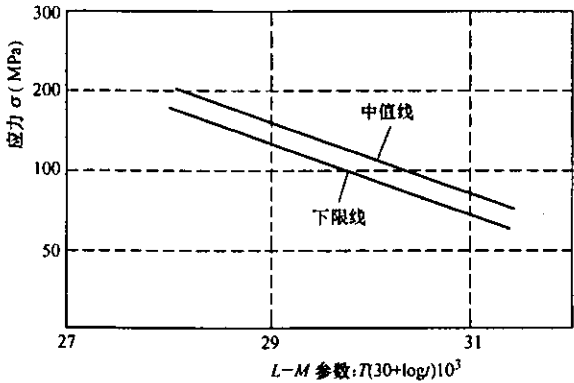


图 A.1 P91 钢的 L — M 参数曲线

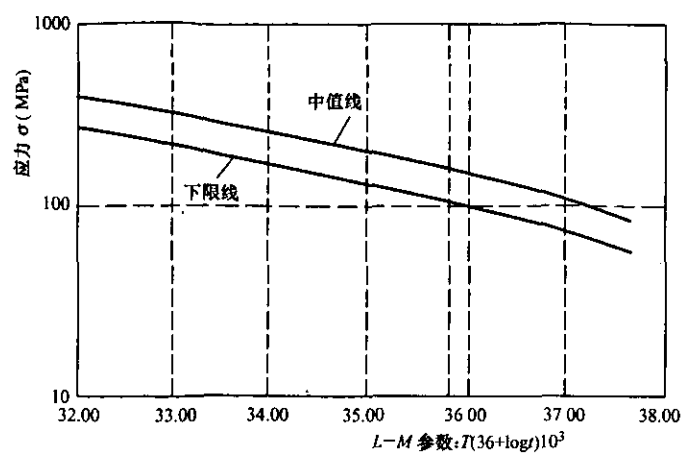


图 A.2 P92 钢的 $L-M$ 参数曲线

附录 B

(资料性附录)

评估管道蠕变寿命的 θ 法

B.1 用一组样品在不同温度、不同应力水平下进行蠕变断裂试验(按 GB/T 2039 执行),获得各样品在某一温度、应力下的蠕变断裂曲线。

B.2 利用下式拟合每一样品在其温度、应力下的蠕变断裂曲线(见图 B.1),求解每一样品蠕变方程中的 θ_i ($i=1, 2, 3$)。

$$\varepsilon = \theta_1 t + \theta_2 (e^{\theta_3 t} - 1) \quad (\text{B.1})$$

式中:

θ_1 、 θ_3 ——蠕变第二阶段和第三阶段的速率参数;

θ_2 ——蠕变第三阶段的变形参数;

t ——蠕变时间。

B.3 利用式(B.1)中求解的 θ_i 、试验温度 T 和应力 σ ,求解下式中的系数 a_i 、 b_i 、 c_i 和 d_i ,建立 θ_i 与温度 T 、应力 σ 的关系(见图 B.2)。

$$\lg \theta_i = a_i + b_i \sigma + c_i T + d_i \sigma T \quad (\text{B.2})$$

式中:

a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i ——与应力、温度有关的系数。

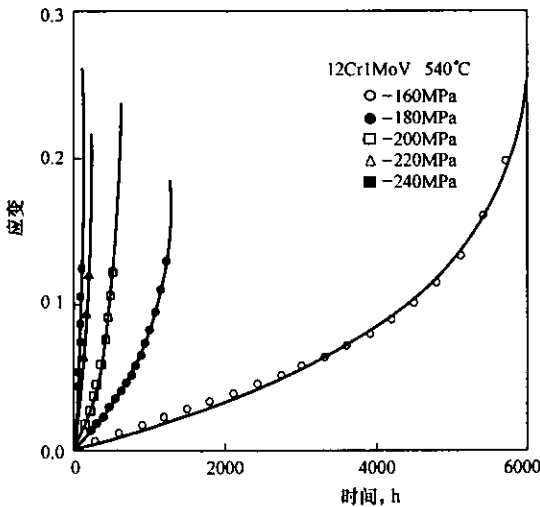


图 B.1 12Cr1MoV 钢在不同应力下的蠕变断裂曲线

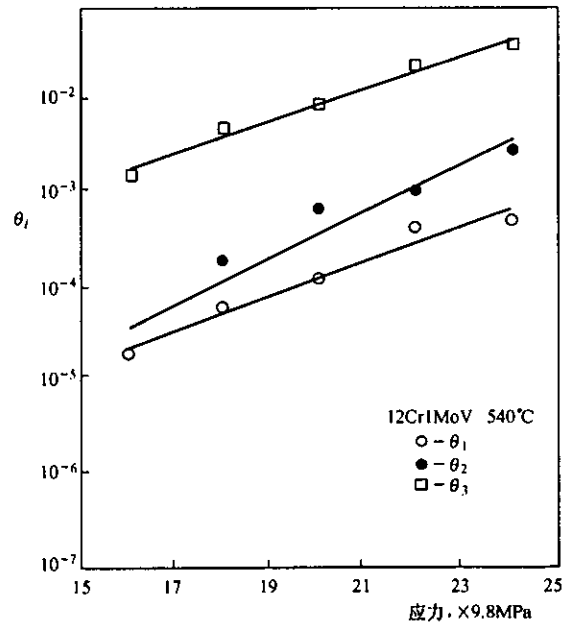


图 B.2 12Cr1MoV 钢 θ_i 与应力的关系

B.4 根据求解的式(B.2)中的 a_i 、 b_i 、 c_i 和 d_i 确定某一温度、应力下的 θ_i ,再将 θ_i 代入式(B.1)中确定蒸汽管道在其服役条件(温度、压力)下的材料蠕变变形曲线(见图 B.3)。

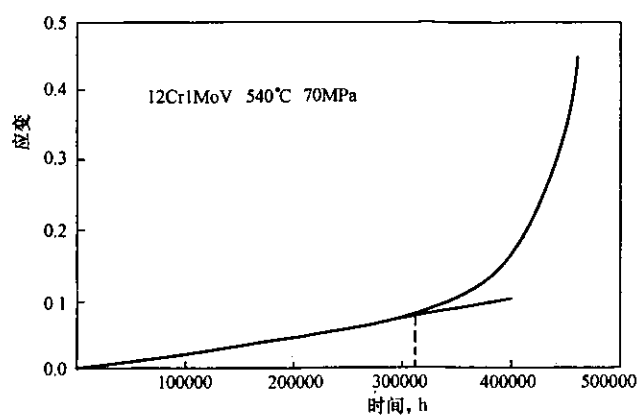


图 B.3 12Cr1MoV 钢的 $\epsilon-t$ 曲线

B.5 在蒸汽管道服役条件下的材料蠕变变形曲线上，将第二阶段（近似直线）向第三阶段过渡切点（见图 B.3）的蠕变应变定为失效点，即可确定蠕变寿命。

附录 C
(资料性附录)

常用蒸汽管道钢的低周疲劳性能参数

C.1 常用蒸汽管道钢的低周疲劳性能参数

常用蒸汽管钢的低周疲劳性能参数见表 C.1。

表 C.1 常用蒸汽管道钢的低周疲劳性能参数

材料	材料状态	试验温度 ℃	$R_{p0.2}(\sigma_{0.2})$ MPa	$R_m(\sigma_b)$ MPa	σ'_f/E	b	e'_f	c	试验频率 Hz
15CrMo		20		455	0.00487	-0.1100	0.3990	-0.5300	(0.125~1.39)
12Cr1MoV	正火+回火	20	375	509	0.00345	-0.0678	0.6114	-0.6389	(0.1~0.625)
10CrMo910	540℃、10MPa 下运行 10.8 万 h	20	294	520					(0.28~2.45)
		540	201	334	0.00270	-0.0878	0.1398	-0.4708	
20 号	热轧	20		430		-0.1200	0.3600	-0.5400	—
P91 母材	正火+回火	20	550	670~685	0.0059	-0.0972	1.325	-0.7740	应变速率 $4 \times 10^{-3}/s$
		550	365	410	0.00372	-0.0796	1.252	-0.787	
		575	350	375	0.00229	-0.0625	1.098	-0.788	
P91 焊接接头	焊后 760℃ 保温 2h 炉冷	20	453	660~700	0.0054	-0.097	3.4264	-0.8675	
		550	330	375		-0.0531	1.221	-0.764	
		575	310	335		-0.0628	1.753	-0.806	

表 C.1 中所列试验数据均为轴向应变控制、三角波加载，则应变比为：

$$r = \varepsilon_{\min} / \varepsilon_{\max} = -1 \quad (C.1)$$

式中：

ε_{\min} ——最小应变；

ε_{\max} ——最大应变。

C.2 低周疲劳公式

低周疲劳公式如下：

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (N_f)^b + e'_f (N_f)^c \quad (C.2)$$
$$\varepsilon_a = (\varepsilon_{\min} + \varepsilon_{\max}) / 2$$

式中：

ε_a ——应变幅；

σ'_f ——疲劳强度系数，MPa；

E ——材料弹性模量，MPa；

b ——疲劳强度指数；

e'_f ——疲劳延性系数；

c ——疲劳延性指数；

N_f ——失效循环数。

附 录 D
(资料性附录)
主蒸汽管道寿命评估举例

D.1 案例

某厂一台 WG-410/100-3 型锅炉, 过热蒸汽压力为 9.8MPa, 温度为 540℃。主蒸汽管道材料为 10CrMo910 钢, 规格为 $\phi 273 \times 22\text{mm}$ 。机组累计运行 168270h, 需对管道的蠕变寿命进行评定。

D.2 收集资料

按本标准 4.1.1 收集机组或蒸汽管道设计、安装和运行资料。

D.3 管道现状检查

按本标准 4.1.1 中的 g) 进行主蒸汽管道现状检查。

D.4 壁厚校核

按 GB 9222—1988 中的式 (39) 计算管道的理论壁厚:

$$S_L = \frac{pD_o}{2\phi_n[\sigma] + p} \quad (\text{D.1})$$

式中:

p ——管道运行压力, 9.8MPa;

D_o ——管子外径, 273mm;

ϕ_n ——纵焊缝减弱系数 (对无缝钢管取 1);

$[\sigma]$ ——材料的许用应力, 按 DL/T 5054 中表 A.4 取 52.0MPa。

由式 (D.1) 计算的 $S_L=23.5\text{mm}$ 。

蒸汽管道需要的最小壁厚 $S_{\min}=S_L+C$ 。

C 为考虑蒸汽管道的腐蚀减薄与钢管的下偏差负值之和, 对在役蒸汽管道, 只考虑腐蚀减薄量, 一般取 0.5mm。故:

$$S_{\min}=23.5+0.5=24.0 \text{ (mm)}$$

实测管子的最小壁厚为 21.0mm, 小于计算的最小壁厚 (24.0mm), 故该主蒸汽管道不满足壁厚要求。

D.5 I 级评估

D.5.1 内压应力分析

管道内压应力为:

$$\sigma_{zs} = \frac{p(D_o - S)}{2S} = \frac{9.8 \times (273 - 21.0)}{2 \times 21.0} = 58.8 \text{ (MPa)} \quad (\text{D.2})$$

式中:

S ——测定的最小壁厚 (21.0mm)。

D.5.2 利用 DL/T 654—1998 的图 4 估算寿命

在图 4 中的下限曲线上查得应力为 58.8MPa 时, $P=36800$, 将 540℃换算为列氏温度得到 $T=1463.7^\circ\text{R}$ 。将 P 、 T 值代入 $P=T(20+\lg t_r)$ 中得 $t_r=138600\text{h}$ 。

由 I 级评估的简单计算可见：该主蒸汽管道可能已经失效（在大约 138600h 左右）。很显然该主蒸汽管道已运行了 168270h 且仍在继续运行，应该还有剩余寿命。故 I 级评估所预测的寿命比较保守，应进入 II 级评估或直接进入 III 级评估。

D.6 III级评估

D.6.1 监督段割管进行材料的力学性能试验、微观组织检查和碳化物相分析

D.6.1.1 微观组织检查与碳化物相分析

微观组织检查表明，管道材料的微观金相组织为粒状贝氏体+碳化物，晶界上碳化物呈孤立分布，数量较多，未见晶界孔洞，表明管道材料微观组织的老化处于 C~D 级之间（10CrMo910 钢的微观组织老化级别分为 A、B、C、D、E 五个级别）；另外，钢中 Cr、Mo 元素有 20.0% 和 72.8% 已进入碳化物中，碳化物相以 M_6C 和 $M_{23}C_6$ 为主，其结果表明与微观组织的老化程度相近。

D.6.1.2 持久强度试验

对管样制备持久强度试样，然后在 540℃ 下进行持久强度试验。对试验结果用最小二乘法进行拟合，得到 540℃ 下的持久强度曲线计算式为：

$$\sigma = 231.6(t_r)^{-0.0856} \quad (D.3)$$

式中：

σ ——应力，MPa；

t_r ——断裂时间，h。

当 $t_r=10^4$ h 时， $\sigma_{10^4}^{540}=105.3$ MPa；

当 $t_r=10^5$ h 时， $\sigma_{10^5}^{540}=86.4$ MPa。

D.6.2 蠕变变形测量

管道的 21 组蠕变变形测量值中，最大值为 0.47%。

D.6.3 壁厚重新校核

根据割管试验获得的等温线持久强度曲线公式，获得的材料 10 万 h 的持久强度为 86.4MPa，取 1.5 安全系数的许用应力为 57.6MPa，大于按标准取值 52.0MPa，故对运行 168270h 的主蒸汽管道壁厚不需重新校核；但当由割管试验获得的材料 10 万 h 的持久强度除以 1.5 安全系数得到的许用应力小于按标准取值时，应对管道壁厚按割管试验获得的许用应力重新校核。

D.6.4 寿命估算

a) 母材寿命估算。按等温线外推法估算蒸汽管道寿命，将 $\sigma_{10^4}^{540}$ 、 $\sigma_{10^5}^{540}$ 和 $\sigma_{zs}(=\sigma_{\theta\max})$ 的值代入本标准式 (7)，取 $n=1.5$ 得管道剩余寿命为 $t_r=78663$ h。

b) 焊缝寿命估算。依据焊缝持久试验结果，按式 (6) 计算得焊缝材料的持久强度 $\sigma_{10^4}^{540}$ 、 $\sigma_{10^5}^{540}$ 分别为 80.9MPa 和 66.4MPa，将焊缝持久强度代入式 (7)，取 $n=1.5$ 得管道焊缝的剩余寿命为 $t_r=3641$ h。

D.6.5 管道剩余寿命综合分析

- 由等温线外推法估算的管道蠕变剩余寿命为 78663h，剩余寿命较长；
- 管道材料微观组织老化程度为 C~D 级；
- 管道材料中 72.8% 的 Mo 已进入碳化物中，其结果表明与微观组织的老化程度相近；
- 管道最大蠕变应变为 0.47%，表明管子蠕变变形仍处于第二阶段蠕变；
- 根据等温线外推法估算的管道蠕变剩余寿命，材料微观组织的老化程度，碳化物成分分析及管道的蠕变应变测量结果，综合评估管道的剩余寿命可以 70000h；
- 鉴于估算的焊缝的剩余寿命很低，故对焊缝部位应加强无损探伤检测，若发现有裂纹等缺陷，应予以挖补。