

DOI: 10.19666/j.rlfed.202304044

# 考虑评估可靠性的 2.25Cr-1Mo 钢蠕变损伤 剩余寿命预测方法

安艳峰<sup>1</sup>, 刘伟<sup>1</sup>, 梁宝山<sup>1</sup>, 梁志刚<sup>1</sup>, 鞠东利<sup>1</sup>,  
崔雄华<sup>2</sup>, 杨哲一<sup>2</sup>, 吕延军<sup>3</sup>, 石瑞<sup>3</sup>  
(1. 华电能源股份有限公司富拉尔基发电厂, 黑龙江 齐齐哈尔 161041;  
2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;  
3. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

**[摘要]** 蠕变损伤是火电厂管道最常见失效形式之一, 对其进行剩余寿命预测是确保设备使用安全性、利用率和效益最大化的有效保障。基于实际服役超 20 万 h 2.25Cr-1Mo 耐热钢蠕变持久试验数据, 综合考虑工作应力与时间-温度热强参数 (TTP), 分析了 TTP 选择原则及对寿命预测精度的影响, 利用 Z 参数法的关系曲线族表征了不同电厂管道持久性能数据的垂直分散性, 建立了评估寿命预测可靠性的应力-TTP-可靠度曲线, 得出不同电厂管道预测寿命与机组工作状态的关系, 获得不同电厂试样在 540 °C/45.26 MPa 环境下运行的蠕变剩余寿命分别为  $1.7256 \times 10^5$  h 和  $3.3788 \times 10^5$  h, 且预测可靠度达到 99%。研究结果可为电厂设备运行可靠性提供检修建议。

**[关键词]** 2.25Cr-1Mo 耐热钢; 可靠性评估; Z 参数法; 剩余寿命

**[引用本文格式]** 安艳峰, 刘伟, 梁宝山, 等. 考虑评估可靠性的 2.25Cr-1Mo 钢蠕变损伤剩余寿命预测方法[J]. 热力发电, 2023, 52(12): 157-163. AN Yanfeng, LIU Wei, LIANG Baoshan, et al. Considering reliability evaluation of creep rupture residual life prediction method of 2.25Cr-1Mo[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 157-163.

## Creep rupture residual life prediction method of 2.25Cr-1Mo considering reliability evaluation

AN Yanfeng<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, LIANG Baoshan<sup>1</sup>, LIANG Zhigang<sup>1</sup>, JU Dongli<sup>1</sup>,  
CUI Xionghua<sup>2</sup>, YANG Zheyi<sup>2</sup>, LYU Yanjun<sup>3</sup>, SHI Rui<sup>3</sup>

(1. Huadian Energy Co. Ltd. Fulalji Power Plant, Qiqihar 161041, China;  
2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;  
3. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Creep rupture is one of the most common failure modes of pipelines used in thermal power plants. Residual life prediction is an effective guarantee to ensure the safety, utilization and benefit maximization of equipment. Based on the creep rupture test data of 2.25Cr-1Mo heat-resistant steel in actual service for over 200 000 hours, the selection principle of TTP parameters and its influence on the accuracy of life prediction are analyzed by comprehensively considering the working stress and TTP parameters. The relationship curve family of Z-parameter method is used to characterize the vertical dispersion of pipeline durability data in different power plants. The stress-TTP-reliability curve for evaluating the reliability of life prediction is established, and the relationship between the predicted life of different power plant pipelines and the working state of the unit is obtained. The creep residual life of different power plant samples at 540 °C/45.26 MPa is  $1.7256 \times 10^5$  h and  $3.3788 \times 10^5$  h respectively, and the predicted reliability reaches 99%, which provide maintenance suggestions for the operation reliability of power plant equipment.

**Key words:** 2.25Cr-1Mo heat-resistant steel; reliability evaluation; Z-parameter method; residual life prediction

收稿日期: 2023-04-23

第一作者简介: 安艳峰 (1973), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电厂设备评估与管理, Zks4128@163.com。

通信作者简介: 吕延军 (1972), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为机械可靠性、工业润滑与工程摩擦学, yanjunlu@xaut.edu.cn。

对发电厂延寿热电联产机组主要设备进行可靠性管理,开展未来性能的预测和评估,是确保设备使用安全性、利用率和效益最大化的有效保障。火电机组关键部件大多处于高温高压使用条件,常通过分析其损伤模式进行可靠性评估<sup>[1-2]</sup>。锅炉管道等承压部件材质为耐热钢<sup>[3]</sup>,其常见的损伤失效模式有蠕变、疲劳、磨损、腐蚀等,其中起主导作用是蠕变损伤<sup>[4-9]</sup>。可靠性评估是进行寿命预测和安全性分析的基础,更是衡量产品可靠性是否达到预期设计目标的主要途径,其评估过程是根据承压部件的试验数据及统计分布规律,再利用概率统计方法对产品特征量进行统计推断分析<sup>[10-13]</sup>。

2.25Cr-1Mo 系铁素体耐热钢,如 ASME 标准中钢号为 SA-213 T22 (管子)和 SA-335 P22 (管道)的材质,广泛应用于火电厂主蒸汽及再热蒸汽管道等<sup>[14]</sup>。影响其断裂时间的主要因素是温度和应力,常用温度、应力和时间的变化曲线来表征蠕变过程。席与珩等<sup>[15]</sup>通过测量管道内壁氧化层厚度和金属壁厚对某电厂的锅炉导汽管进行蠕变剩余寿命估算。蠕变寿命评估以持久强度试验为主,采用加速实验法可有效缩短试验时间。

近年来,用外推法预测不同使用条件下的剩余蠕变寿命,已从等温线外推法演化为 Larson-Miller 参数外推(L-M)法<sup>[16]</sup>、Manson-Harferd (M-H)法<sup>[17]</sup>和 Orr-Sherby-Dorn (OSD)法<sup>[18]</sup>等。Roy 等人<sup>[19]</sup>基于加速蠕变持久试验,用 L-M 法评估了 2.25Cr-1Mo 钢不同应力、温度下的蠕变寿命,却未对剩余寿命结果进行分析评定。周立群等<sup>[20]</sup>对比了 3 种常用的 TTP 法,并用 Z 参数进行材料持久性能的可靠性评估,但研究对象是 25Cr20NiNbN 钢。Z 参数法是利

用材料的应力与 L-M 参数间不同 Z 值关系曲线族来分析持久性能劣化程度的方法。L-M 法<sup>[21-22]</sup>是应用最为广泛的外推法,但在短时蠕变模拟试验预测长时剩余寿命时,难免出现外推过度的情况,在 L-M 法基础上结合 Z 参数法将预测结果与可靠度关联,可有效确保预测结果的可靠性。

本文以 2.25Cr-1Mo 典型耐热钢为研究对象,综合考虑 TTP 参数预测方法,基于服役超 20 万 h 后管道持久强度试验数据进行统计分布规律研究,将 L-M 法与 Z 参数法结合起来表征持久性能数据的垂直分散性,采用极大似然法估计其分布参数,开展不同可靠度下蠕变损伤评估和构件剩余寿命预测。

## 1 蠕变持久试验及主曲线拟合方法

### 1.1 试验方法及设备

金属的蠕变极限是评定金属部件在高温及应力长期作用下的强度标准,也是评定管道材质使用寿命的主要参数。试验温度 540 °C 为常用工作温度,通过提高试验应力来缩短蠕变断裂时间,从而外推持久服役的剩余寿命。

在 ZST3/3 型高温蠕变试验机上进行载荷不变的蠕变断裂试验,初始载荷从初步试验结果中进行选取,载荷精度小于 1%,蠕变变形精度为 0.001 mm。在试样的测算长度段绑上 3 根 NiCr-NiSi 热电偶,用来测定试样的温度波动和梯度值,保证控温精度 $\leq 3$  °C,温度梯度 $\leq 3$  °C。蠕变持久试验试样为圆形横截面标准蠕变试样,规格为  $D10\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ ,具体尺寸如图 1 所示。将试样加热至 540 °C,沿试样的轴线方向施加恒定载荷,直至试样断裂,并测定其蠕变时间。

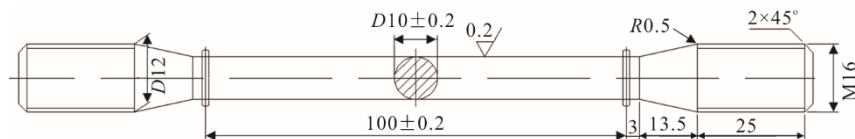


图 1 蠕变持久试验试样 (mm)  
Fig.1 Creep endurance test sample (mm)

为分析不同电厂机组运行工况,以上试验所用试样来源于不同电厂使用的 P22 钢管道,其组织为铁素体+贝氏体,老化 3~4 级,运行工况基本相同且服役时长均超过了 20 万 h。本文所用持久蠕变试验数据中,最长蠕变时间为 13 565.6 h,对应试验载荷为 90 MPa,试验数据见表 1。

### 1.2 拟合方法选择

在上述持久蠕变试验基础上,运用 L-M 法将试验条件下蠕变断裂试验结果进行归纳,采用温度和时间可以互为补偿的  $P_{L-M}$  参数用于外推高温材料的寿命,其表达式为<sup>[17]</sup>:

$$P_{L-M} = 10^{-3} T (\lg t_r + C) \quad (1)$$

表 1 蠕变持久试验数据  
Tab.1 Creep endurance test data

序号	试验应力 $\sigma$ /MPa	断裂时间 $t$ /h	序号	试验应力 $\sigma$ /MPa	断裂时间 $t$ /h	序号	试验应力 $\sigma$ /MPa	断裂时间 $t$ /h
1	200	5.34	23	110	3 174	45	140	181.0
2	180	21.00	24	105	4 557	46	140	140.0
3	160	48.30	25	120	644	47	120	740.0
4	140	297.90	26	115	1 026	48	120	632.0
5	130	469.28	27	110	1 820	49	110	2 407.0
6	100	4 004.00	28	105	2 457	50	110	1 834.0
7	90	10 655.00	29	100	4 229	51	90	13 565.6
8	114	1 396.80	30	120	783	52	95	7 093.0
9	112	2 072.89	31	115	660	53	100	3 393.4
10	120	888.70	32	110	1 858	54	110	1 504.0
11	110	1 611.00	33	110	1 666	55	110	1 117.1
12	150	58.00	34	105	2 896	56	120	352.0
13	140	112.00	35	105	2 487	57	90	11 571.0
14	130	158.00	36	100	3 918	58	98	4 731.0
15	130	240.00	37	100	4 667	59	104	3 213.0
16	110	1 240.00	38	95	9 018	60	110	1 701.0
17	110	1 084.00	39	140	125	61	120	1 129.8
18	95	3 744.00	40	140	120	62	130	619.0
19	95	4 596.00	41	120	654	63	140	263.0
20	130	535.00	42	120	590	64	150	170.0
21	120	1 547.00	43	110	1 904			
22	115	2 211.00	44	110	1 580			

式中： $C$  为材料常数； $T$  为绝对温度，K； $t_r$  为断裂时间，h； $P_{L-M}$  为 Larson-Miller 参数。由于不同材料有不同的材料常数，利用各应力水平和温度下的 2.25Cr-1Mo 钢试验数据，选定  $P_{L-M}$  中材料常数  $C$  为 20。

为建立参数  $P_{L-M}$  和应力  $\sigma$  间的函数表达式  $\lg \sigma - P_{L-M}$ ，采用参数拟合法对其进行判定，常用的参数拟合法有多项式拟合、对数拟合和指数拟合<sup>[23]</sup>。多项式拟合在预测条件超出数据区间时，拟合曲线趋势改变使得推算结果误差较大。为提高拟合优度，采用三次项对数拟合分析，表达式为：

$$\lg \sigma = C_1 + C_2 \lg P_{L-M} + C_3 \lg^2 P_{L-M} + C_4 \lg^3 P_{L-M} \quad (2)$$

若采用指数拟合分析，表达式为：

$$\lg \sigma = C_1 - C_2 \exp[C_3 P_{L-M}] \quad (3)$$

为进一步确定拟合曲线符合原始数据点的分布趋势，运用决定系数  $r$  来判定拟合优度，其在 [0,1] 上取值，具体表达式为<sup>[9]</sup>：

$$r^2 = \frac{S_r}{S_t} = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

式中：总偏差平方和  $S_t$  反映  $y_i$  的离散程度；回归平方和  $S_r$  反映回归值  $\hat{y}_i$  的离散程度；决定系数  $r$  越接近于 1，拟合曲线越符合原始数据点的分布趋势。

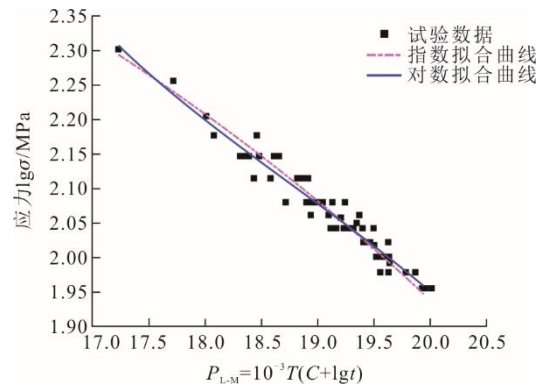


图 2 指数法与对数法拟合对比  
Fig.2 The fitting comparison between exponential method and logarithmic method

即使采用三次项对数拟合，通过对比计算，得到指数曲线拟合的决定系数为 0.979 6，对数曲线拟合的决定系数为 0.951 9。指数法与对数法拟合对比如图 2 所示。图 2 中试验数据点均分布在主曲线周围，但指数拟合效果更好，故本文选取指数曲线拟合。根据本文试验数据拟合得  $C_1=4.387 00$ ， $C_2=0.755 00$ ， $C_3=0.060 01$ 。根据 2.25Cr-1Mo 钢持久性能数据得到的  $\lg \sigma - P_{L-M}$  关系主曲线为：

$$\lg \sigma = 4.387 00 - 0.755 00 \exp[0.060 01 P_{L-M}] \quad (5)$$

## 2 Z 参数与可靠性分析

### 2.1 Z 参数分布

为分析构件持久性能的分散性,用 Z 参数来表征试验数据点偏离主曲线的程度:

$$Z_i = \lg \sigma_i - 4.387 + 0.755 \exp \left[ \frac{0.060 \ 01 \times 10^{-3} T_i \cdot}{(\lg t_{ri} + 20)} \right] \quad (6)$$

式中:  $Z_i$  为数据点  $i$  的偏离程度;  $\sigma_i$ 、 $T_i$  和  $t_{ri}$  分别为数据点  $i$  的试验应力、试验温度和持久断裂时间。

基于式(6)计算 2.25Cr-1Mo 钢 64 个数据的 Z 参

数值,并假设 Z 参数服从正态分布。对 Z 参数分布进行 K-S 拟合优度检验,则经验累计概率  $F_n(Z)$  与理论累计概率  $F(Z)$  的最大差值,即检验统计量  $D_n$  的观察值为:

$$D_n = \max \{ |F_n(Z) - F(Z)| \} \quad (7)$$

取 K-S 检验的显性水平为 0.05 时,相应的临界值  $D_{n-\alpha} = 1.36 / \sqrt{64} = 0.17$ ,即检验统计量  $D_n$  的拒绝域为  $(0.17, +\infty)$ ,根据表 2 的分析结果,由于  $D_n < D_{n-\alpha}$ ,故原假设成立。

表 2 正态性检验分析结果  
Tab.2 Analysis results of normality test

项目	样本量	平均值	标准差	偏度	峰度	Kolmogorov-Smirnov 检验	
						统计量 $D_n$ 值	$p_1$
Z 参数	64	-0.001	0.037	-0.078	-0.190	0.096	0.155

通过对 Z 参数进行 K-S 检验得到 2.25Cr-1Mo 钢的母体平均值  $\mu$  为 -0.001, Z 参数分布的标准差  $\sigma_z$  为 0.037 的正态分布,其对应的概率密度函数为:

$$f(Z_i) = \frac{1}{0.037\sqrt{2\pi}} \times \exp \left[ -\frac{(Z_i + 0.001)^2}{2 \times 0.037^2} \right] \quad (8)$$

### 2.2 对 Z 参数分布进行参数估计

虽然 K-S 检验获得了 Z 参数正态分布的均值与方差,但其取值误差较大,还需进行进一步的计算以获得更准确的取值,具体如图 3 所示。采用极大似然估计法得到正态分布下的参数均值及方差估计量的似然函数为<sup>[10]</sup>:

$$L(Z|\mu, \sigma_z^2) = (2\pi\sigma_z^2)^{-\frac{N}{2}} \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma_z^2} \sum_{i=1}^N (Z_i - \mu)^2 \right] \quad (9)$$

则有:

$$\ln L = -\frac{N}{2} \ln(2\pi) - \frac{N}{2} \ln \sigma_z^2 - \frac{1}{2\sigma_z^2} \sum_{i=1}^N (Z_i - \mu)^2 \quad (10)$$

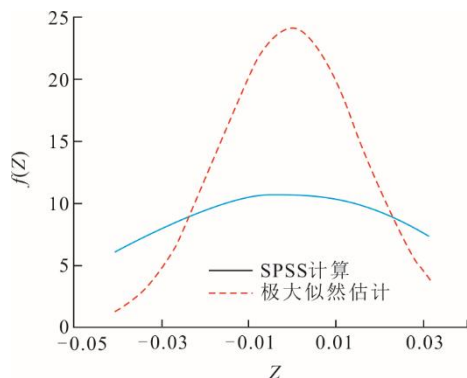


图 3 试验数据均值、标准差估计情况

Fig.3 Estimation of mean and standard deviation of test data

令

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \mu} \ln L = \frac{1}{\sigma_z^2} \left[ \sum_{i=1}^N (Z_i - N\mu) \right] = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \sigma_z^2} \ln L = -\frac{N}{2\sigma_z^2} + \frac{1}{2(\sigma_z^2)^2} \sum_{i=1}^N (Z_i - \mu)^2 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

求解式(11)第 1 式得到  $\mu$  后,代入第 2 式得到正态分布参数的最大似然估计量为:

$$\hat{\mu} = \bar{Z} \quad \hat{\sigma}_z^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2 \quad (12)$$

式中:  $N$  为数据量;  $\bar{Z}$  为参数 Z 的平均值;  $Z_i$  为第  $i$  个数据的 Z 值。

### 2.3 剩余寿命的可靠性评估

通过上述计算得到均值  $\mu$  较小,这与主曲线代表材料持久性能的平均性能特性相对应,得到其概率密度函数为:

$$f(Z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \times 2.575 \times 10^{-4}}} \times \exp \left( -\frac{(Z_i + 2.765 \times 10^{-4})^2}{2 \times 2.575 \times 10^{-4}} \right) \quad (13)$$

根据可靠性理论,由于 Z 参数的分布服从正态分布规律,将 Z 参数的概率密度进行曲线积分,从而得到关于可靠度 R 的计算公式为:

$$R(Z) = 1 - \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z_p} \exp \left( -\frac{Z^2}{2\sigma_z^2} \right) dZ = \Phi \left( \frac{Z_p}{\sigma_z} \right) \quad (14)$$

式中:  $\Phi(\bullet)$  表示标准正态分布函数;  $Z_p/\sigma_z$  为给定可靠度 R 下的正态分布值。

从正态分布表中可以查到 R 值,从而计算出特

定可靠度  $R$  下的  $Z$  参数值, 即可实现特定可靠度下材料的持久性能可靠性评估和剩余寿命预测。图 4 为根据以上计算、运用本文试验数据得到预测可靠度  $R$  为 97.78% 时不同应力下电厂管道的蠕变剩余寿命  $t_r$ 。

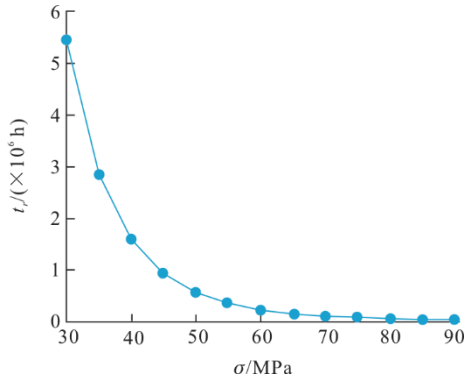


图 4 540 °C 下断裂时间与应力关系  
Fig.4 The relationship between fracture time and stress at 540 °C

### 3 TTP 参数选择与预测结果分析

#### 3.1 不同 C 值对预测精度的影响

图 5 显示了不同  $C$  值下同一钢管试验数据所得主曲线拟合结果。从图 5 可以观察到,  $C$  值越大, 主曲线越靠右上方。不难发现, 当基于 L-M 参数模型对耐热钢的持久性能进行剩余寿命预测时, 对同一材料的参数模型, 不同  $C$  值对剩余寿命预测结果影响较大。本文对 2.25Cr-1Mo 钢的  $C$  值取 20, 但实际上为了获得更高精度的预测结果, 则需要对持久性能数据进行优化处理, 以得到适合此种材料的  $C$  值<sup>[20]</sup>。

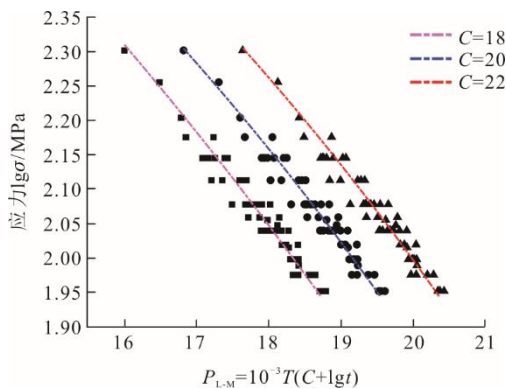


图 5 2.25Cr-1Mo 钢基于不同 L-M 常数  $C$  的蠕变断裂数据分析结果

Fig.5 Analysis results of creep fracture data of 2.25Cr-1Mo steel based on different L-M constant  $C$ s

事实上, 由于材料持久性能数据具有分散性,  $C$  值不会集中到一固定点, 而是在一定范围内分布<sup>[24]</sup>。研究发现  $C$  值是碳质量分数的函数<sup>[25]</sup>, 且其他合金

元素对其无明显影响, 其计算公式为:

$$C = 21.200 - 5.625(\omega_c) \quad (15)$$

$$\text{或 } C = 21.300 - 5.800(\omega_c)$$

式中:  $\omega_c$  为碳质量分数。根据电厂提供的 2.25Cr-1Mo 钢的碳质量分数为 0.13%, 算得  $C=20.469$ , 以下分析均按此值进行。

#### 3.2 不同电厂管道数据偏离度分析

图 6 为不同电厂服役超 20 万 h 的 2.25Cr-1Mo 钢的  $\lg \sigma - P_{L-M}$  曲线, 并与前面得到的主曲线进行对比。对于同一管道, 虽然来自不同电厂管道的数据存在一定的分散性, 通过对比不难发现数据间差异明显。从图 6 可以看出: a 电厂管道数据在主曲线的左下方, 整体数据平行于主曲线, 这是由于 a 电厂管道服役时间最长, 偏离主曲线的程度最大, 故其蠕变断裂性能的恶化程度更严重; b 电厂管道数据与主曲线重合度较高, 但未平行于主曲线, 说明其个别管道剩余寿命较低且该电厂管道数据分散性较高。设计应力为 45.26 MPa、可靠度在 99% 时, 通过分析计算得到 a 电厂管道的剩余寿命为  $1.725 6 \times 10^5$  h, b 电厂管道的剩余寿命为  $3.378 8 \times 10^5$  h。因此, a 电厂管道比 b 电厂管道应提前进行安全检查以确保运行可靠性。

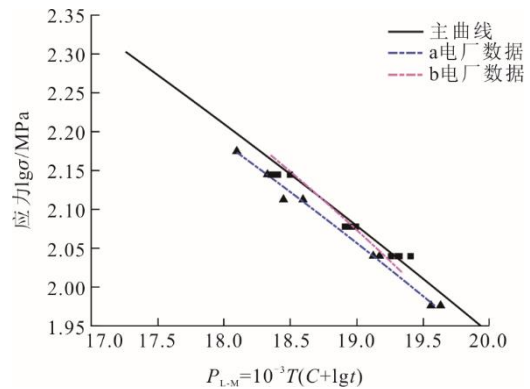


图 6 不同电厂管道数据与主曲线对比情况  
Fig.6 Comparison of pipeline data of different power plants with the main curve

以上数据特性与各电厂机组工作状态密切相关, 也进一步验证了同一管道, 不同电厂的寿命各不相同, 在进行寿命预估时应该结合各电厂情况具体分析。

#### 3.3 应力-TTP-可靠度预测曲线

通过选取不同可靠度即可得到对应的  $Z$  参数值, 进而可以得到不同可靠度下应力-TTP 曲线, 即应力-TTP-可靠度曲线, 具体如图 7 所示。由图 7 可

以看出,可靠度分别为 99.99%、92.00%和 70.00%时,可靠度越大,预测曲线越靠左下方,其分布趋势与材料持久性能数据的分布趋势相吻合。当可靠度在 92.00%以上时,即可保证所有实验数据点均满足预测寿命。这一曲线明确了在各可靠度下的应力,以及预测曲线与试验数据良好的对应关系,表明本文所用方法对 2.25Cr-1Mo 钢开展高温蠕变性能剩余寿命预测的高可靠性。

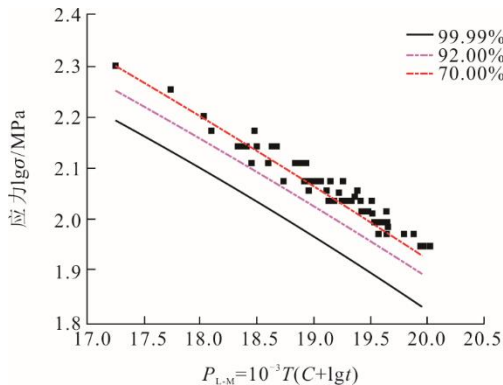


图 7 2.25Cr-1Mo 钢应力-TTP-可靠度曲线  
Fig.7 2.25Cr-1Mo steel stress-TTP-reliability curve

## 4 结 论

通过外推法设计温度和应力条件下的寿命,是目前具有高置信度及可靠性的寿命预测与评估方法。 $Z$  参数法则进一步证明了耐热钢材料的高温持久性能与持久蠕变损伤评估的可靠性。通过对实际工作工况下 2.25Cr-1Mo 系耐热钢蠕变持久试验数据的积累,综合考虑应力与 TTP 预测方法,在 L-M 法基础上利用  $Z$  参数法的关系曲线族表征持久性能数据的垂直分散性。基于  $Z$  参数法建立了蠕变断裂剩余寿命评估可靠度思想,获得不同电厂试样在 540 °C/45.26 MPa 环境下运行的蠕变剩余寿命分别为  $1.7256 \times 10^5$  h 和  $3.3788 \times 10^5$  h,且预测可靠度达到 99%,总结了 TTP 选择原则及对寿命预测精度的影响,在 TTP 法基础上得到了持久性能可靠性设计及寿命预测的应力-TTP-可靠度曲线,建立了考虑服役条件波动性及持久性能分散性下进行可靠性评估及持久剩余寿命预测的流程与方法,得到不同电厂管道在特定工作温度与应力下的剩余寿命,为电厂设备运行可靠性提供检修建议。

### [参 考 文 献]

[1] ZHAO J, HAN S Q, GAO H B, et al. Remaining life assessment of a 1Cr5Mo steel by using Z-parameter method[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters),

- 2004, 17(4): 601-605.
- [2] HAN Z Y, CAO L W, WANG L K, et al. Material degradation analysis and reliability assessment of residual life for service-exposed reformer tubes[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(8): 5458-5466.
- [3] 史天宇, 孔维雄, 陈雨琳, 等. 新型高氮马氏体耐热铸钢的热处理及相变解析[J]. 材料导报, 2022, 36(增刊 1): 20120084.  
SHI Tianyu, KONG Weixiong, CHEN Yulin, et al. Investigation on heat treatment and phase transformation for a new high nitrogen martensitic heat-resistant cast steel[J]. Materials Reports, 2022, 36(Suppl.1): 20120084.
- [4] DING K, WEI T, HUO X, et al. Dramatically enhanced creep rupture performance and failure analysis of 9Cr-CrMoV dissimilar welded joint[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18(10): 4007-4018.
- [5] 曹海涛, 谢晶, 崔雄华. P22 再热热段蒸汽管道长期运行后剩余寿命评估研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(5): 1121-1124.  
CAO Haitao, XIE Jing, CUI Xionghua. Residual life evaluation of P22 reheat pipeline after long-term operation[J]. Foundry Technology, 2018, 39(5): 1121-1124.
- [6] 张辉, 李茂东, 卢忠铭, 等. SA335-P22 钢主蒸汽管道非破坏性剩余寿命评估方法[J]. 理化检验(物理分册), 2015, 51(2): 100-104.  
ZHANG Hui, LI Maodong, LU Zhongming, et al. Non-destructive remaining life evaluation method of SA335-P22 steel main steam pipe[J]. PTCA (part A: Physical Testing), 2015, 51(2): 100-104.
- [7] 王伟, 周荣灿, 钟万里, 等. 高铬马氏体耐热钢蠕变损伤评估技术研究进展[J]. 热力发电, 2016, 45(5): 1-8.  
WANG Wei, ZHOU Rongcan, ZHONG Wanli, et al. Review of assessment techniques for creep damage in martensitic heat-resistant steels with high Cr content[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(5): 1-8.
- [8] 晏思聪, 彭华, 李泰来, 等. 汽包与管道抗疲劳断裂可靠性分析方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2001, 34(1): 60-64.  
YAN Sicong, PENG Hua, LI Tailai, et al. A method for analyzing reliability of steam bags and pipelines to resist fatigue fracture[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2001, 34(1): 60-64.
- [9] HUANG Y Y, ZHAN Y C, LUO X W, et al. Creep deformation and rupture behavior of 10Cr-3Co-2W heat-resistant steel weldments in ultra supercritical power units[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 133: 105984.
- [10] BANAHEVYCH Y V, ANDREYKIV O E, KIT M B. Prediction of residual pipeline resource taking into account the operation loading conditions[J]. Strength of Materials, 2009, 41(1): 32-38.
- [11] LIU D, LIU W J, XU S D, et al. A novel method for residual life assessment of used parts: a case study of used lathe spindles[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 1: 1-14.
- [12] ZHANG Y, JING H Y, XU L Y, et al. Creep behavior and life assessment of a novel heat-resistant austenite steel and its weldment[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2019, 32(5): 638-650.
- [13] XING L, ZHAO J, SHEN F Z, et al. Reliability analysis and life prediction of HK40 steel during high-temperature exposure[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006, 83(10): 730-735.

- [14] 崔雄华, 郑坊平, 谢继旭, 等. P91 主蒸汽管道硬度偏低问题的试验分析与恢复[J]. 电力设备, 2007, 8(12): 31-34.  
CUI Xionghua, ZHENG Fangping, XIE Jixu, et al. Experimental analysis and comeback of lower hardness problem of P91 main steam pipe[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(12): 31-34.
- [15] 席与珩, 刘丽梅, 崔雄华, 等. 锅炉导汽管材质状态和蠕变剩余寿命评估[J]. 热力发电, 2011, 40(8): 8-11.  
XI Yuheng, LIU Limei, CUI Xionghua, et al. Evaluation of material state and creep residual life of steam conduit for boilers[J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(8): 8-11.
- [16] YANG R C, LI Z, CHEN K. Research on physical significance of the Larson-Miller parameter and its electron theory for heat-resistant steels[J]. Key Engineering Materials, 2007, 353: 477-480.
- [17] ABE F, KERN T U, VISWANATHAN R. Creep-resistant steels[M]. England: Woodhead Publishing, 2008: 217-240.
- [18] SHERBY O D, ORR R L, DORN J E. Creep correlations of metals at elevated temperatures[J]. Journal of Metals, 1954, 6(1): 71-80.
- [19] Roy P K. Creep rupture analysis and life estimation of 1.25Cr-0.5Mo, 2.25Cr-1Mo and modified 9Cr-1Mo steel: a comparative study[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series D, 2018, 99(3): 33-38.
- [20] 周立群, 张朱武, 刘康林. 基于 TTP 参数法的 25Cr20NiNbN 钢持久寿命评估方法[J]. 压力容器, 2014, 31(11): 61-66.  
ZHOU Liqun, ZHANG Zhuwu, LIU Kanglin. Creep life prediction of 25Cr20NiNbN stainless steel based on TTP methods[J]. Pressure Vessel Technology, 2014, 31(11): 61-66.
- [21] YANG R C, CHEN K, FENG H X, WANG H. Determination and application of Larson-Miller parameter for heat resistant steel 12Cr1MoV and 15CrMo[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2004, 17(4): 471-476.
- [22] 张华煜, 李国栋, 秦凤明, 等. 309S 耐热不锈钢蠕变行为及寿命预测[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(3): 264-271.  
ZHANG Huayu, LI Guodong, QIN Fengming, et al. Creep behavior and life prediction of 309S heat-resistant steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(3): 264-271.
- [23] 方园园, 赵杰, 李东明. 9Cr1Mo 型耐热钢持久性能的统计分析及其可靠性预测[J]. 机械强度, 2010, 32(5): 750-753.  
FANG Yuanyuan, ZHAO Jie, LI Dongming. Statistical analysis and reliability prediction of creep rupture property for 9Cr1Mo-type heat-resistant steels[J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(5): 750-753.
- [24] 徐振, 孙国栋, 贾贺泽, 等. Larson-Miller 常数的优化求解及在持久寿命预测中的应用[J]. 热加工工艺, 2015, 44(4): 94-96.  
XU Zhen, SUN Guodong, JIA Heze, et al. Optimization method for Larson-Miller constant and its application on rupture life prediction[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(4): 94-96.
- [25] LIU H, XUAN F Z. A new model of creep rupture data extrapolation based on power processes[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(8): 2324-2329.

(责任编辑 邓玲惠)