

# 基于 Z 参数和可靠度的蠕变损伤模型

赵 杰\*, 邢 丽, 马海涛, 冯 炜

(大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 基于 Z 参数和可靠性评估研究了蠕变损伤, 提出利用 Robinson 法则评估的蠕变损伤与可靠度密切相关. 对 5Cr-0.5Mo 和 HK40 两种材料蠕变断裂数据的分析表明: 由于蠕变数据的偏差可用 Z 参数来表征, 且 Z 参数服从正态分布, 可以把可靠度和蠕变损伤关联起来. 给出了两种材料在不同可靠度下的损伤程度, 并与实际服役管段的数据进行了比较. 结果表明, 在一定温度和应力下, 可靠度越大, 蠕变损伤积累值也就越大. 而且, 不同服役时间的实验数据点和预测的损伤积累线吻合较好.

**关键词:** 蠕变损伤; Z 参数; Robinson 法则; 可靠度; Larson-Miller 法

**中图分类号:** TG111; TP202 **文献标志码:** A

## 0 引言

在石油、化工和电力等行业中, 许多设备和构件都承受着高温高压的作用. 高温构件往往是企业的核心设备, 在高温高压服役过程中, 由于组织劣化及材料损伤, 最终造成构件失效, 而蠕变则是高温构件破坏的主要因素之一. 因此, 为了保证高温装置的可靠性, 持久寿命和蠕变损伤的评估一直是高温材料使用中关注的焦点. 目前, 比较常用的评估方法主要有 Larson-Miller 法<sup>[1]</sup>、Monkman-Grant 关系<sup>[2]</sup>和 Robinson 线性损伤积累法则<sup>[3]</sup>等, 这些方法已成功应用于许多工程领域.

Robinson 寿命分数法则的提出, 是为了预测服役期间不同温度和载荷历史条件下材料的寿命. 该方法基于单轴加载试样的实验, 然而在服役中绝大多数构件和结构通常承受着多轴载荷的作用, 压力容器、涡轮机叶片和转子都是常见的例子. 因此, 利用 Robinson 法则对这些构件进行寿命预测时经常会大幅度地偏离实际<sup>[4]</sup>. 但是 Robinson 寿命分数法则简单方便, 不失为一种寿命预测的保守估计方法, 目前, 它仍然广泛应用于石化装置及蒸汽涡轮零部件的蠕变寿命评估.

由于材料性能数据的分散性, 预测结果与可靠度密切相关. 在材料的疲劳寿命预测中可靠性思想得到了广泛应用, 但对于基于持久性能数据的蠕变断裂寿命预测尚没有成熟的应用. 本文在以往研究基础上, 把寿命预测的 Z 参数法<sup>[5]</sup>引入到 Robinson 线性损伤积累法则中, 并以石化及常规核电站等高温装置常用的 5Cr-0.5Mo 和 HK40 两种耐热钢为例, 介绍结合 Z 参数法和可靠性思想对 Robinson 蠕变损伤计算模型的评价.

## 1 基于 Z 参数和可靠度的 Robinson 法则的评价

### 1.1 Z 参数法

20 世纪 50 年代, 出现了外推精度较高的时间-温度参数外推方法, 其中最著名的外推公式是 Larson-Miller (L-M) 公式:

$$P(\sigma) = T(\lg t_r + C) \quad (1)$$

式中: C 为材料常数; T 为热力学温度;  $t_r$  是断裂时间;  $P(\sigma)$  是随应力变化的函数, 或称为 L-M 参数. L-M 参数是时间-温度的复合参量, 对耐热钢和耐热合金而言, 鉴于其工作性质, 其实质上是一

收稿日期: 2006-12-15; 修回日期: 2008-10-07.

基金项目: 国家“八六三”计划资助项目(2006AA04Z421).

作者简介: 赵 杰\* (1964-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: jiezhao@dlut.edu.cn.

个热强参量.这一方法已广泛应用于多种耐热钢和高温合金.

通常,研究者根据材料的 L-M 参数和应力  $\sigma$  之间的关系绘出特征曲线,即主曲线.这样,在得知构件所承受的温度和应力后,即可推算出其可使用的寿命.因此,选择合适的 L-M 参数和应力之间的函数关系式是准确推算寿命的关键.多项式拟合是常用的方法<sup>[6]</sup>,可表达为

$$P = (Z_0 - Z) + C_1 \log \sigma + C_2 \log^2 \sigma + C_3 \log^3 \sigma \quad (2)$$

其中  $P$  为 L-M 参数;  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  均为常数;  $Z$  对于一特定的曲线是一常数,简称为  $Z$  参数,利用偏离主曲线的程度来表征持久性能的分散程度;  $Z_0$  表征持久性能主曲线的持久强度.日本科技厅金属材料研究所(简称 NRIM)对 40 余种耐热钢和合金在不同温度和应力水平下进行了大量的持久试验,积累了丰富的实验数据.本文以 5Cr-0.5Mo 和 HK40 两种材料为例,利用式(2)对其 NRIM 实验数据<sup>[7,8]</sup>进行拟合,得到主曲线的表达形式为

5Cr-0.5Mo 钢:

$$P = (17.56 - Z) + 11.40 \log \sigma - 7.16 \log^2 \sigma + 0.95 \log^3 \sigma \quad (3)$$

HK40 钢:

$$P = (22.434 - Z) - 4.127 \log \sigma - 0.098 \log^2 \sigma - 0.076 \log^3 \sigma \quad (4)$$

分析表明,用多项式拟合在已有数据范围内会得到较好的结果,但是当预测条件超出数据区间时,有时在低应力段因拟合曲线趋势的变化而使寿命预测产生很大的误差<sup>[5]</sup>.因而作者曾提出持久性能数据拟合的另一表达形式:

$$P = (Z_0 - Z) - A \log \sigma - B \sigma \quad (5)$$

其中  $Z$  和  $Z_0$  的意义与式(2)相同,  $A$  和  $B$  是常数.这一形式不仅能得到置信度比较高的拟合曲线,而且在预测低应力段的寿命时表现出良好的变化趋势.同样,得到 5Cr-0.5Mo 和 HK40 两种钢的主曲线的表达形式如下:

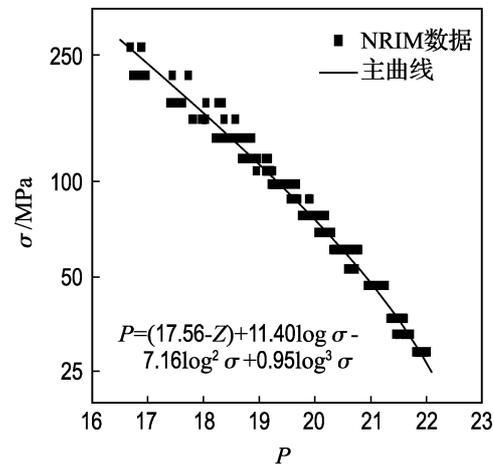
5Cr-0.5Mo 钢:

$$P = (27.963 - Z) - 3.971 \log \sigma - 0.007 \sigma \quad (6)$$

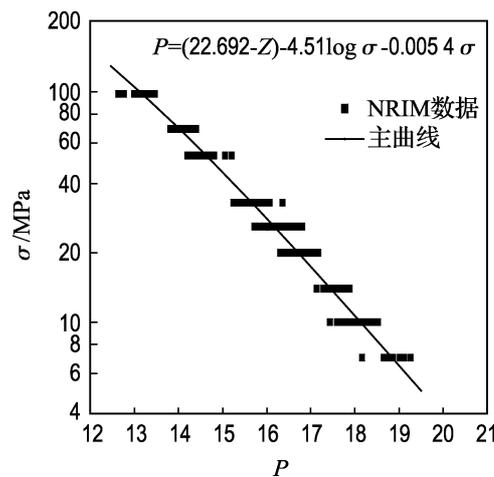
HK40 钢:

$$P = (22.692 - Z) - 4.51 \log \sigma - 0.0054 \sigma \quad (7)$$

对于本文的分析,无论利用方程(2)或(5),对  $Z$  参数值的影响不大.图 1 为 5Cr-0.5Mo 和 HK40 钢的蠕变断裂数据及拟合的主曲线.上述  $Z$  参数方法是作者基于 Larson-Miller 关系而提出来的利用不同  $Z$  值的  $\sigma$ - $P$  关系曲线族来表示持久性能分散程度的方法.



(a) 5Cr-0.5Mo 钢,  $P = 10^{-3} T(20 + \lg t_r)$



(b) HK40 钢,  $P = 10^{-3} T(10.315 + \lg t_r)$

图 1 两种钢的持久强度性能( $\sigma$ - $P$  关系)  
Fig. 1 Creep rupture strength properties of the steels ( $\sigma$ - $P$  parameter)

## 1.2 持久性能数据的可靠性分布

尽管持久性能数据通常“压缩”为一条单一的主曲线,但是材料本身数据的分散性对寿命预测有着很大的影响,因此,利用合适的可靠性分布来预测寿命是十分必要的.随着科学技术的发展,可靠性技术愈来愈被人们所重视<sup>[9]</sup>,现已应用于电子、航空、宇航工业甚至普及到民用工业,但它很

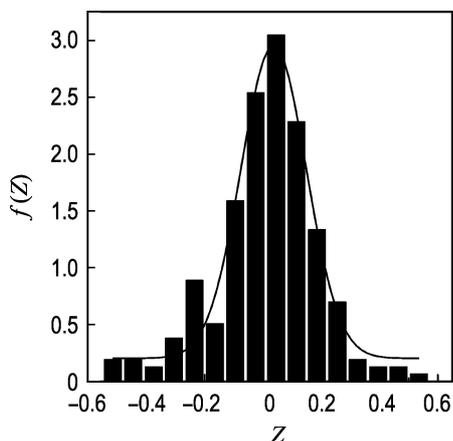
少应用于高温构件的蠕变寿命及损伤评估,因此,研究与可靠性相关的蠕变损伤评估是一项非常有益的工作. Evans<sup>[10]</sup> 分析了 CrMoV 钢的蠕变失效数据,表明它很好地服从对数正态分布,文献 [5]证明了 Z 参数较好地服从于正态分布.那么, Z 参数的概率密度表达形式为

$$f(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(Z-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

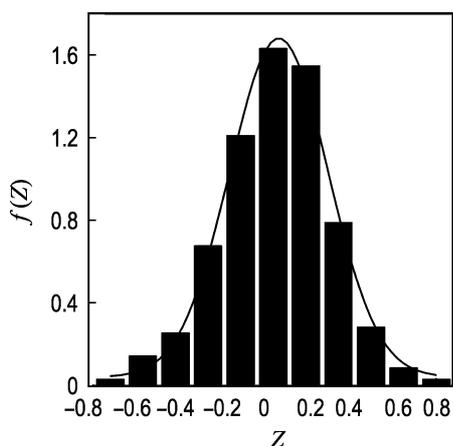
其中  $\mu$  为均值,  $\sigma$  为标准差. 而可靠度  $R(z)$  则可以表示为

$$R(z) = P(Z > z) = \int_z^{\infty} f(z) dz \quad (9)$$

图 2 是基于 5Cr-0.5Mo 和 HK40 钢蠕变断裂数据的 Z 参数分布. 从图中可以看出,与 5Cr-0.5Mo 钢相比, HK40 钢的 Z 参数分布曲线



(a) 5Cr-0.5Mo 钢



(b) HK40 钢

图 2 两种钢 Z 参数的正态分布

与柱形图之间吻合较好. 通过  $\chi^2$  检验可知, 5Cr-0.5Mo 和 HK40 两种钢的 Z 参数均服从正态分布, 其均值和标准差见表 1.

表 1 两种钢 Z 参数分布的均值和标准差

Tab.1 The mean value and the standard deviation of Z-parameter distribution of two steels

钢	$\mu$	$\sigma$
5Cr-0.5Mo	0.036	0.174
HK40	0.074	0.266

依据分布获得某一可靠度下的 Z 参数值后, 就可以根据前述的 Z 参数与温度、应力、时间之间的关系计算预测相应的温度和应力下的使用寿命.

### 1.3 基于 Z 参数及可靠度的 Robinson 法则

Robinson 寿命分数法则是预测不同服役条件下材料寿命的一种简单方法, 它把损伤的积累看成是一个线性过程. 从热力学观点看, 损伤是一个不可逆过程的内变量, 从宏观上表现为材料的强度和寿命下降. 此法基于以下两点独立假设<sup>[11]</sup>:

(1) 在一定的温度和应力下, 蠕变损伤和消耗的断裂寿命分数是成比例的, 即

$$D_i = t_i / t_{fi} \quad (10)$$

式中:  $D_i$  代表在  $\sigma_i$  和  $T_i$  下经历时间  $t_i$  后的损伤积累;  $t_{fi}$  代表同样条件下的断裂寿命.

(2) 每个载荷周期所引起的蠕变损伤是彼此独立的, 这意味着加载顺序不影响寿命预测, 当各个载荷周期的损伤累积达到 1 时, 断裂就会发生, 即

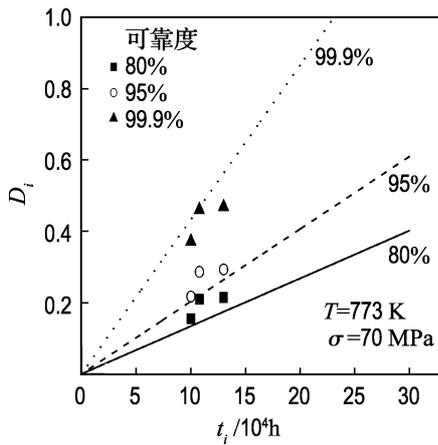
$$\sum_i \frac{t_i}{t_{fi}} = 1 \quad (11)$$

从以上持久性能数据带及 Z 参数分布图可以看出, 仅用主曲线来预测寿命是不够精确的. 在同样温度和应力下, 不同可靠度下的寿命预测值是不一样的, 可靠度的较小变化, 将会导致寿命预测值较大的变动. 式(9)和(10)中的  $t_{fi}$  这一项是与可靠度密切相关的, 可靠度越大,  $t_{fi}$  越小.  $t_{fi}$  是在温度  $T_i$  和应力  $\sigma_i$  下的持久断裂时间, 它可根据引入 Z 参数的 Larson-Miller 公式外推求得. 根据两种钢一般服役的工况条件, 在以下外推中, 本文取

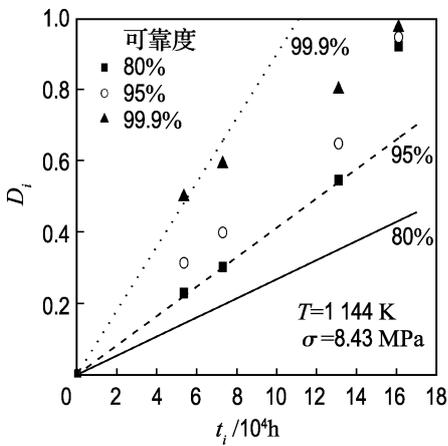
Fig. 2 A normal distribution of Z-parameter of the two steels

5Cr-0.5Mo 钢的温度和应力分别为 500 °C 和 70 MPa, HK40 钢分别取 871 °C 和 8.43 MPa 来进行计算和讨论。

图 3(a)和(b)分别是 5Cr-0.5Mo 和 HK40 两种钢在不同可靠度下蠕变损伤随时间的积累。从图中不同可靠度下的损伤积累线可以看出,随服役时间的延长,蠕变损伤成线性增加。在同一服役时间下,可靠度越高,损伤积累值就越大,由此可以得知,蠕变损伤与可靠度是密切相关的。



(a) 5Cr-0.5Mo 钢



(b) HK40 钢

图 3 不同可靠度下损伤随时间的积累

Fig. 3 Damage accumulated with service time at various confidence levels

图 3 中还列出了依据服役不同时间的实验数据计算得到的不同可靠度下的损伤积累值。其中图 3(a)中数据点是根据文献[12~14]中的服役时间分别为 100 000、107 800 和 130 000 h 的

Cr5Mo 钢持久试验数据为基础计算而得到的。图 3(b)中的数据点是根据文献[15]中的服役时间分别为 53 600、73 000、131 000 和 161 000 h 的 HK40 钢持久试验数据而得到的。各服役时间下材料的损伤值  $D_i$  的计算依下式进行:

$$D_i = \frac{t_i}{t_i + t_{p,i}} \quad (12)$$

式中:  $t_i$  是已服役时间,  $t_{p,i}$  是材料经  $t_i$  服役时间后所预测的在某一可靠度下的剩余使用寿命。

比较实际服役材料的数据可以看出,在可靠度一定时,长期服役后的损伤值较短期服役大,这是因为预测的  $t_{p,i}$  值随服役时间的延长而减小,使得蠕变损伤值增大。同样,在服役时间一定时,可靠度越大,损伤积累值也越大。而且,数据点均落在了可靠度为 80% 和 99.9% 的损伤积累线之间。

## 2 结 语

在以往研究的 Z 参数方法的基础上,对高温高压构件寿命预测及损伤评估常用的 Robinson 法则进行了评价,并提出持久寿命及损伤评估与可靠度相关这一思想。5Cr-0.5Mo 和 HK40 两种钢的 NRIM 数据表明,在同一温度和应力下,随时间的延长,损伤成线性增加,可靠度越大,损伤的积累也就越大。从实际服役材料的数据可以看出,数据点均落在了可靠度为 80% 和 99.9% 的损伤积累线之间,实验数据与预测的结果吻合较好。

## 参考文献:

- [1] LARSON F R, MILLER J. A time-temperature relationship for rupture and creep stresses [J]. *Transactions of the ASME*, 1952, **74**:765-781
- [2] MONKMAN F C, GRANT N J. An empirical relationship between rupture life and minimum creep rate in creep-rupture tests [J]. *Proceedings of ASTM*, 1956, **56**:593-605
- [3] ROBINSON E L. Effect of temperature variation on the creep strength of steels [J]. *Transactions of the ASME*, 1938, **60**:253-259
- [4] JING J P, MENG G, SUN Y, *et al.* A continuum damage mechanics model on creep rupture life assessment of a steam turbine rotor [J]. *Transactions*

- of the ASME, 2006, **128**:173-177
- [5] ZHAO J, HAN S Q, GAO H B, *et al.* Remaining life assessment of a CrMoV steel using the Z-parameter method [J]. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 2004, **81**: 757-760
- [6] 魏铁铮, 谢英柏. 锅炉高温受热部件的计算方法[J]. 动力工程, 2000, **20**(1):528-530
- [7] National Research Institute for Metals. **Data Sheets on the Elevated Temperature Properties of 5Cr-0.5Mo Steel Tubes for Boilers and Heat Exchangers** [M]. Japan:National Research Institute for Metals, 1992
- [8] National Research Institute for Metals. **Data Sheets on the Elevated Temperature Properties of Centrifugally Cast 25Cr-20Ni-0.4C Steel Tubes for Use in Reformer Furnaces** [M]. Japan:National Research Institute for Metals, 1996
- [9] CIAMPOLI M. Time dependent reliability of structural systems subject to deterioration [J]. **Computers and Structures**, 1998, **67**:29-35
- [10] EVANS M. Statistical properties of the failure time distribution for 1/2Cr1/2Mo1/4V steel [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 1995, **54**: 171-180
- [11] DYSON B. Use of CDM in materials modeling and component creep life prediction [J]. **Journal of Pressure Vessel Technology**, 2000, **122**:281-296
- [12] 李培宁, 宋超群, 冯韵芬, 等. 炼油厂 Cr5Mo 工艺管线的蠕变损伤及剩余寿命[J]. 压力容器, 1992, **9**(1):20-27
- [13] 邵潭华, 周丽霞, 薛锦, 等. Cr5Mo 钢管及其焊接接头长期服役后的组织性能与剩余寿命[J]. 焊接学报, 1988, **9**(1):10-16
- [14] 王来, 祝苏明, 王富岗, 等. Cr5Mo 炉管高温长期服役后的剩余寿命[J]. 石油化工设备, 1994, **23**(1): 12-15
- [15] XING Li, ZHAO Jie, SHEN Fu-zhong, *et al.* Reliability analysis and life prediction of HK40 steel during high temperature exposure [J]. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 2006, **83**: 730-735

## Creep damage model based on Z-parameter and confidence level

ZHAO Jie\*, XING Li, MA Hai-tao, FENG Wei

( School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** The creep damage method has been investigated based on the Z-parameter and the reliability evaluation, and the damage evolution estimated by the Robinson's rule is presented to be correlated to the confidence level. From the investigation of 5Cr-0.5Mo and HK40 NRIM data, it is shown that a normal distribution is supported for the value of the Z-parameter which can reflect the deviation of creep rupture data, and therefore, the damage can be in connection with the confidence level. The damage evolution of these two steels at different confidence levels in contrast with that of removed tubes at different time is presented. At a certain stress and temperature, the higher the confidence level, the more the damage accumulation. In addition, the data points based on the experimental data of removed tubes at different time are in good agreement with the damage accumulation lines.

**Key words:** creep damage; Z-parameter; Robinson's rule; confidence level; Larson-Miller method