

# FES-DP 系统及 Z 参数法评定 Cr5Mo 钢的剩余寿命

FES-DP System and Z Parameter Method to Evaluating  
Residual Life of Cr5Mo Steel

谢守明, 高宏波, 赵 杰, 王 来, 韩双起 (大连理工大学, 大连 116024)  
XIE Shou-ming, GAO Hong-bo, ZHAO Jie, WANG Lai, HAN Shuang-qi  
(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**摘要:** 珠光体耐热钢是石化装置常用的炉管材料, 针对其在高温服役中的安全评估问题, 研究开发了 FES-DP 高温管线安全评估决策支持系统, 并介绍了 FES-DP 系统的基本结构。针对常用的耐热钢 Cr5Mo 介绍了寿命评估的基本策略, 提出用  $P = 29.608 - Z - 5.085 \lg \sigma$  表征平行于 Cr5Mo 钢持久性能主曲线的曲线族, 其中  $Z = 0.203 (E - 1)$ , 参数  $Z$  表征了持久性能退化程度,  $E$  为球化等级。由此可以通过对构件组织的评定来定量预测构件的剩余寿命。

**关键词:** 高温管线; 寿命评估; 珠光体耐热钢; 支持系统

**中图分类号:** TE963; TG142.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2004) 04-0043-03

**Abstract:** Pearlite heat resistant steels are widely used as high temperature pressurized tube materials in petro-chemical equipments. So FES-DP decision-making system for safety evaluation of high temperature tubes had been developed. This paper described the basic structure of FES-DP, and took Cr5Mo steel as an example to develop the strategy to evaluating residual life. The formula of  $P = 29.608 - Z - 5.085 \lg \sigma$  expresses a group of curves paralleling to the creep-rupture strength main curve of Cr5Mo steel. The relationship between creep-rupture strength deterioration and microstructure degradation is founded;  $Z = 0.203 (E - 1)$ ,  $Z$  and  $E$  is the degree of creep-rupture strength deterioration and the grade of microstructure degradation respectively. So the residual life can be predicted by analyzing the microstructure degradation of the components.

**Key words:** high temperature tubes; residual life evaluation; pearlite heat resistant steel; decision-making system

珠光体耐热钢是石化装置常用的炉管材料, 在高温压力长期作用下, 珠光体将发生球化, 同时,  $\alpha$  固溶体中合金元素发生贫化, 向碳化物中迁移, 而碳化物在晶界或晶内沉淀析出并长大<sup>[1]</sup>。这些组织转变过程使材料的持久强度降低, 最终造成构件失效, 因此对设备的剩余寿命评估一直受到研究者的关注<sup>[2,3]</sup>。对于高温条件下使用的珠光体耐热钢, 由于性能的退化主要是通过组织的劣化而造成的, 因此通过对炉管材料组织的检测来评定设备的状态是重要的方法之一<sup>[4]</sup>。在国标上也制定出了珠光体耐热钢组织变化的评定标准<sup>[5,6]</sup>。然而这些方法大多局限于定性的预测, 并且由于检测大多在大修期间进行, 不能对运行中的设备随时在线评定。

在欧美等工业发达国家开发了许多智能和界面友好的决策支持软件系统, 如在德国的 MPA Stuttgart<sup>[7]</sup>已开发了一系列智能信息管理和决策支持系统。本工作在对珠光体耐热钢研究总结的基础上,

建立了其组织劣化等级与性能参数之间的定量关系。并针对石化企业使用珠光体耐热钢的加热炉装置, 依据软件工程原理, 采用数据库和面向对象编程技术开发了一套用于石化企业高温管线安全评估的决策支持系统, 即 FES-DP 系统。

## 1 FES-DP 系统的介绍

FES-DP 软件系统的框架主要包括四个模块。

(1) 材料数据库模块: 该模块包含了在对高温炉管的剩余寿命进行评估的过程中需要涉及的大量相关材料数据, 如炉管的材质、外径、壁厚、使用温度、使用压力、投用日期以及一些检测数据等。该模块主要包括一个材料数据库和其用户界面。用户通过材料数据库界面对材料数据库中的数据进行维护与管理, 同时为 FES-DP 系统的评估模块提供所必需的数据;

(2) 组织图谱库模块: 该模块由标准组织图谱库、实际组织图谱库和组织图谱等级评定模块构成。可以

实现对 12Cr1MoV, Cr5Mo 和 20 号钢三种材料标准组织图谱和实际组织图谱的维护,同时可以进行组织劣化等级的评定;

(3) 评估模块:该模块利用各数据库中的相关数据和信息,按照一定的评估策略和方法,对炉管的运行状况和剩余寿命进行评估;

(4) 装置管理条例:该模块包括一个装置管理条界面,用于查询并维护相关装置的安全操作准则和管理条例。

在整个系统中,评估模块是核心,而评估策略是关系预测结果是否可靠的关键。下面以 Cr5Mo 钢为例介绍 FES-DP 系统进行剩余寿命评估基本策略。

## 2 Cr5Mo 钢剩余寿命评估的基本策略

### 2.1 剩余寿命评估的基本方法

在长期的研究和实践中,提出了多种高温构件剩余寿命的预测方法,如 OSD 参数法、Larson-Miller (LM) 参数法、Manson-Haferd (MH) 参数法、Evans 等提出的  $\theta$  法等<sup>[8,9,10]</sup>。其中 Larson-Miller (LM) 参数法由于考虑了温度、压力和时间之间的关系,并且在实践中得到成熟的应用,因此广泛用于评价在高温蠕变过程的材料行为。

LM 参数  $P$  的形式是:  $P = T \cdot (C + \lg t_r)$ , 其中:  $T$  为温度,  $t_r$  为断裂时间,  $C$  是一常数,对珠光体耐热钢,一般  $C$  的值取 20<sup>[8]</sup>。通常,研究者根据材料的 LM 参数和应力  $\sigma$  之间的关系绘出特征曲线,在得知构件所承受的应力、温度后,即可推算其可使用的寿命。因此,选择适当的 LM 参数和应力之间的函数关系是准确推算寿命的关键。多项式拟合是常用的方法<sup>[11]</sup>,即依据式 (1) 获得 LM 参数和应力之间的函数关系:

$$P = C_0 + C_1 \lg \sigma + C_2 \lg^2 \sigma + C_3 \lg^3 \sigma \quad (1)$$

其中:  $C_0, C_1, C_2, C_3$  为常数。

分析表明,用多项式拟合虽然在已有数据范围内得到较好的结果,但当预测条件超出数据区间时,则因拟合曲线趋势的变化(如图 1 中的 B, C 段所示)而造成推算结果有较大的误差。经过对 LM 参数和应力之间函数数学表达式的考察,我们选用式 (2) 作为其关系的表达式:

$$P = C_0 - Z + C_1 \lg \sigma + C_2 \sigma \quad (2)$$

其中:  $C_0, C_1, C_2$  为常数;  $Z$  是反映材料性能劣化的参数;  $\sigma$  为应力。

根据式 (2) 所得的拟合曲线如图 1 中的 A 段所示,采用这种函数表达式,不仅能得到置信度高的拟合曲线,更重要的是,即使是外推至低应力区间,即在实验数据点以外的区域,LM 参数和应力之间也遵

循相应的关系变化趋势。

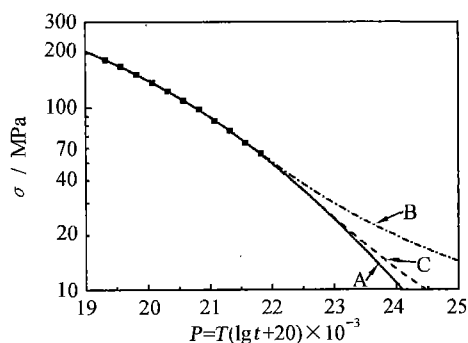


图 1 用不同方法拟合的持久性能曲线

Fig. 1 Creep-rupture strength curves fitted with different methods

### 2.2 组织劣化与 $Z$ 参数之间的关系

对 Cr5Mo 钢主曲线拟合如下:

$$P = 29.608 - 5.085 \lg \sigma \quad (3)$$

而平行于其主曲线的曲线族则表示为:

$$P = 29.608 - Z - 5.085 \lg \sigma \quad (4)$$

其中  $Z$  对于一特定的曲线是一常数,表征了曲线偏移主曲线的位置。 $Z$  的值越大,越偏离主曲线。

构件在高温高压环境中使用,由于组织的劣化将导致性能的退化,这在 LM 参数和应力关系上表示为平行主曲线左移。对于珠光体耐热钢来说,组织劣化主要通过珠光体的球化等级来表示,根据 Cr5Mo 钢在高温运行后的组织变化规律,将其球化等级分为六级。图 2 显示了 Cr5Mo 钢处于不同球化级别时的持久性能数据及拟合曲线,可以看出随着组织劣化,剩余寿命下降,相应的数据曲线左移,在式 (4) 中表现为  $Z$  值的逐渐增加。由于 LM 参数主要是基于持久性能数据得到的,因此  $Z$  值主要反映了材料持久性能的变化,也可以说是反映材料性能劣化的参数。而材料的性能与组织劣化直接相关,这在图 2 中表现为随着球化级别增加,曲线左移。可以说,参数  $Z$  表征了材料的性能状态及组织劣化程度。因此,如果能建立组织变化参数与  $Z$  参数之间的定量关系,就可以依据组织劣化程度来定量推算构件的剩余寿命。

根据图 2 中性能数据,得出 Cr5Mo 钢球化等级  $E$  与  $Z$  参数之间的关系如图 3 所示,其数学表达式如式 (5) 所示:

$$Z = 0.203(E - 1) \quad (5)$$

其中  $E$  为珠光体球化级别,组织劣化越严重,参数  $Z$  的值越大,在图 2 中相应的曲线向左偏离主曲线越严重,持久性能越低。因此,利用组织劣化级别与  $Z$  参数的关系,可以估测持久性能的降低程度,从而定量

推算构件的剩余寿命。

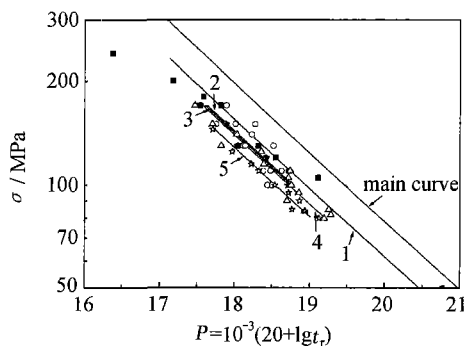


图2 Cr5Mo 钢持久性能曲线

Fig. 2 Creep-rupture strength curves of Cr5Mo steel

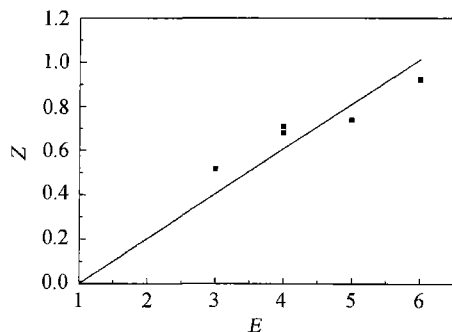


图3 Z 参数与球化等级的关系

Fig. 3 Relationship between Z parameter and microstructure degradation

## 4 结论

(1) 针对加热炉管常用珠光体耐热钢开发了 FES-DP 高温管线安全评估决策支持系统。

(2) 在分析多项式拟合 LM 参数和应力之间的函数关系利弊的基础上, 提出用以下公式表示平行于 Cr5Mo 钢持久性能主曲线的曲线族:  $P = 29.608 - Z - 5.085 \lg \sigma$ 。其中 Z 参数表征了曲线偏移主曲线的位置, 同时表征了相关材料持久性能的变化。

(3) 建立了 Cr5Mo 钢的 Z 参数与组织劣化程度之间的关系:  $Z = 0.203 (E - 1)$ , 因此, 可以通过对构件组织的评定来定量预测构件的剩余寿命。

### 参考文献

- [1] 周顺深. 低合金耐热钢 [M]. 上海: 上海人民出版社, 1976. 116—133.
- [2] 涂善东, 戴树和. 高温过程设备的寿命评价技术进展 [J]. 压力容器, 1996, 13 (2): 151—158.
- [3] 李耀君, 刘树涛, 郝振亚. 高温锅炉管寿命预测技术及其应用 [J]. 热力发电, 1996, 5: 50—53.
- [4] 王富岗, 李德俊, 祝苏明, 等. 转化炉对流段运行状态评估的 TMP 方法 [J]. 大氮肥, 1994, 2: 109—114.
- [5] DL/T 773—2001, 火电厂用 12Cr1MoV 钢球化评级标准 [S].
- [6] DL/T 786—2001, 碳石墨球化检验及评级标准 [S].

- [7] A S Jovanovic, K Maile. Int J Pres Ves & Piping, 1996, 66: 367—379.
- [8] 刘荣藻. 低合金耐热钢的强化机理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1981. 12—18.
- [9] F R Larson and J Miller. Trans ASME, 1952, 74: 765—781.
- [10] R W Evans, J D Parker and B Wilshire. Int J Pres Ves & Piping, 1992, 50: 147—160.
- [11] 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.

收稿日期: 2003-02-28; 修订日期: 2003-09-10

作者简介: 谢守明 (1971-), 男, 在读硕士, 研究方向为珠光体耐热钢的寿命评估, 联系地址: 大连理工大学材料工程系 赵杰转 (116024)。

\* \* \* \* \*

(上接第 39 页)

况下影响平均腐蚀速度的最主要海洋环境因素是溶解氧; 而影响最大点蚀深度的最主要海洋环境因素是水温。

(3) 潮差区短期内影响 LY12CZ 平均腐蚀速度的最主要海洋环境因素是溶解氧, 气象因素是平均风速; 影响最大点蚀深度的最主要海洋环境因素是水温, 气象因素是日照数。长期情况下, 影响 LY12CZ 平均腐蚀速度的最主要海洋环境因素是溶解氧, 气象因素是平均风速, 影响最大点蚀深度的最主要海洋环境因素是盐度, 气象因素是相对湿度。

致谢: 感谢国家自然科学基金委员会材料环境腐蚀网站办公室和北京航空材料研究院提供的部分数据。

### 参考文献

- [1] 虞莲莲. 实用有色金属材料手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 邓聚龙. 灰色预测与决策 [M]. 湖北: 华中理工大学出版社, 1992.
- [3] 傅立. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992.
- [4] 刘永辉, 张佩芬. 金属腐蚀学原理 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [5] 黄桂桥. 铝合金在海洋环境中的腐蚀研究 (II) ——海水全浸区 16 年暴露试验总结 [J]. 腐蚀与防护, 2002, 23 (2): 47—50.
- [6] 侯保荣, 等. 海洋腐蚀环境理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [7] 陈卓元, 等. 东海、南海海域海洋环境因素研究 [J]. 腐蚀与防护, 2000, 21 (6): 248—251.
- [8] 黄桂桥. 铝合金在海洋环境中的腐蚀研究 (I) ——海水潮汐区 16 年暴露试验总结 [J]. 腐蚀与防护, 2002, 23 (1): 18—20.

基金项目: 国防军工环境试验与观测“十五”计划重点项目 (HD-HI32001D001)。

收稿日期: 2003-07-28; 修订日期: 2003-08-18

作者简介: 常彦衍 (1978-), 女, 硕士生。研究方向为腐蚀失效分析, 联系地址: 北京航空航天大学一系八研 (100083)。