

MHZ 常数在耐热钢持久性能预测中的应用

Prediction of Creep Rupture Property Using
MHZ Constant for Heat Resistant Steel

刘春慧,程从前,赵 杰,祝志超,马海涛

(大连理工大学 材料科学与工程学院,辽宁 大连 116085)

LIU Chun-hui, CHENG Cong-qian, ZHAO Jie, ZHU Zhi-chao, MA Hai-tao

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of
Technology, Dalian 116085, Liaoning, China)

摘要: 本研究提出选用 MHZ 常数关联耐热钢持久性能数据,以 HP40 和 Super304 钢为例比较了基于 MHZ 常数和标准推荐 L-M 常数的持久性能曲线与实验数据之间的相关性;并对工业中常用的十七种耐热钢实验数据进行分析,对比了 MHZ 常数和 L-M 常数在持久性能预测精度上的差异。结果表明不同的 L-M 常数对数据拟合结果有较大影响,工程应用中为保证较高预测精度需选用优化的 L-M 常数,否则会导致构件应用时偏危险;对所分析的大部分钢新选用的 MHZ 常数不仅具有更高预测精度和更优拟合效果,而且能更直观比较不同耐热钢之间的持久性能,故可以作为耐热钢的 TTP 参数。

关键词: MHZ 常数;TTP 参数法;耐热钢;持久性能;寿命预测

中图分类号: TG111;TP202 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)10-0012-05

Abstract: Manson-Haferd constants ($T_a=450$, $\lg t_a=15$), which is named as MHZ constant, was proposed to correlate the creep rupture data. HP40 and Super304 heat resistant steels were taken as examples to describe the distinction of correlation between the creep rupture property curves based MHZ constant and L-M constant with experimental data. In order to analyze the applicability of MHZ constant to heat resistant steel, MHZ constant was applied to correlate the creep rupture data for seventeen steels widely used in industry, the corresponding prediction accuracy was compared with that based on recommended L-M constant. The result showed that the stress-rupture curves with different L-M constants steel are obviously different, which means that the L-M constant should be optimized to guarantee enough life prediction accuracy in the engineering components. However, a good agreement with the experimental data and high prediction accuracy has been achieved in the case of MHZ constant. Moreover, MHZ constant displays a relatively high resolution for creep rupture differences between various steels. It suggests that MHZ constant can be used as temperature-time-parameter (TTP) for heat resistant steel.

Key words: MHZ constant;TTP parameter;heat resistant steel;creep rupture property;life prediction

在能源,航空航天,石化等工业领域,耐热钢的高温强度设计及寿命评估技术是确保高温构件安全运行又避免资源浪费的重要环节。近年来为解决日益突出能源短缺和环境问题,在诸如超(超)临界机组等能源领域,要求耐热钢在更高温度更苛刻条件下长时间服役,由此对高温材料寿命预测模型的精确性和可靠性也提出了更严格的要求。目前,已经建立了许多寿命预测模型,其中时间-温度参数法(TTP法),即将时间、温度用一个参数 P 表示以得到 P 与断裂应力之间

的表达式,是工程中广泛应用的一种方法^[1,2]。

Larson-Miller 参数法^[3](简称 L-M 法或 L-M 常数),是 TTP 参数法的一种,表达式为

$$P_{LH}(\sigma) = T(\lg t_r + C) \quad (1)$$

式中: T 为温度(K); t_r 为材料的断裂时间(h); C 为材料常数,由于应用 L-M 法只需确定一个常数 C ,相对而言简便易行,因此成为目前工程界最常用的方法^[4,5]。但有关 L-M 法的预测精度也一直存在疑问。有关分析^[6]表明,L-M 常数 C 的取值对持久性能预测

精度有较大的影响,对部分耐热钢只有采用优化的 L-M 常数 C ,才能得到较高的预测精度。在实际工程应用中,一般采用统一的 L-M 常数,如在一些石化行业标准^[7]中建议铁素体耐热钢和奥氏体耐热钢的 L-M 常数值分别取 $C=20$ 和 $C=15$,这在一定程度上降低了耐热钢持久性能的预测精度。

在对高温材料持久性能数据分析中,一些研究者^[8,9]发现 Manson-Haferd 参数法(简称 M-H 法)相比 L-M 法具有更高的预测精度,但由于 M-H 法需要确定两个常数,限制了其应用。前期的研究^[6]发现 M-H 法中两个常数项之间有良好的线性关系,这为方便确定 M-H 常数,推广 M-H 参数的应用范围,提高预测精度提供了可能。本研究在简单回顾 M-H 参数基础上,通过比较分析 L-M 法和 M-H 法的预测精度,检验用统一的 MHZ 常数来关联一系列耐热钢持久性能数据的可行性。本研究拟合实验数据均由日本物质材料技术研究所(NIMS)提供。

1 M-H 参数法与 MHZ 常数

1953 年 Manson 和 Haferd 注意到了 L-M 方法的局限性,提出了 Manson-Haferd 参数法^[10](简称 M-H 法或 M-H 常数),表达式为

$$P_{MH}(\sigma) = \frac{\lg t_r - \lg t_a}{T - T_a} \quad (2)$$

式中: T 为温度(K); t_r 为材料的断裂时间(h); T_a 和 $\lg t_a$ 为材料常数。一直以来,M-H 常数($T_a, \lg t_a$)被认为是两个相对独立的数值,在数据处理过程中由于需要确定两个常数值,与 L-M 法相比较复杂,因此限制了其应用。但前期工作表明,许多耐热钢的 M-H 常数($T_a, \lg t_a$)之间存在良好的线性关系,如图 1^[6]所示。分析发现在直线上选取不同的 M-H 常数对预测精度的影响较小,即 M-H 常数($T_a, \lg t_a$)可以在图 1 所示直线上较宽的范围取值,并且对预测精度的影响不大。这同时也提出了一种可能性:选取统一的 M-H 常数关联不同钢种的持久性能数据,这样不仅为高温性能数据的外推提供了简便,又能保持较高预测精度。

基于此,在图 1 所示直线中选取 $T_a=450$ 和 $\lg t_a=15$ 作为统一的 M-H 常数,将其称为 MHZ 常数。为清楚的表达 MHZ 常数在关联耐热钢持久性能数据的应用,以 HP40 和 Super304 钢为例分析了基于 MHZ 常数的拟合外推曲线与实验数据之间的相关性;为分析其在常用典型耐热钢的适用性,对 17 种耐热钢数据进行拟合,并比较 MHZ 常数和 L-M 常数在持久性能

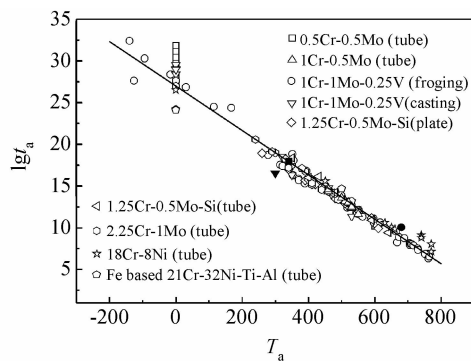


图 1 部分钢中 M-H 常数 $T_a, \lg t_a$ 之间的关系^[6]

Fig. 1 The relationship of M-H constants ($T_a, \lg t_a$) for several steels^[6]

预测精度上的差异。

2 MHZ 常数和 L-M 常数在 HP40 和 Super304 钢中应用的比较分析

以在石油化工装置中常用的 HP40 耐热钢和在超(超)临界电站中使用的 Super304 钢为例,比较 TTP 参数的选择对实验数据外推曲线和持久性能预测的影响。

2.1 HP40 钢

HP40 耐热钢在制氢装置和乙烯裂解设备中广泛应用,久保田^[11]选用 L-M 常数 $C=20$ 作为 HP40 钢的 TTP 参数,石化标准^[7]SH/T 3037—2002 建议奥氏体钢选用 L-M 常数 $C=15$ 。故本研究分别选用 L-M 常数 $C=20, C=15$ 和 MHZ 常数对 HP40 钢实验数据进行拟合,不同常数下持久性能的主曲线如图 2 所示,对比图 2(a), (b) 发现不同的 L-M 常数($C=20$ 和 $C=15$)对数据的拟合程度有所不同,基于 $C=20$ 的曲线与数据拟合决定系数 COD 为 0.9578,拟合精度稍差。基于 MHZ 常数和 L-M 常数 $C=15$ 的主曲线穿过数据带中央,用于衡量数据与曲线之间决定系数接近于 1,两条曲线均有较好的拟合效果。

在主曲线表达式中,若设定温度为常数,基于应力与 TTP 参数之间的关系可以获得不同温度下应力-断裂时间的曲线(即 $\sigma-t_r$ 曲线),它可以更直观的反映曲线与实验数据的拟合情况。基于图 2 中 HP40 钢的三条主曲线,可以分别得到它们在不同温度下的 $\sigma-t_r$ 曲线,如图 3(a), (c) 所示。图 3(a)显示了基于不同 L-M 常数的 $\sigma-t_r$ 曲线,可以看出 $C=20$ 的曲线严重偏离数据带, $C=15$ 的曲线基本上穿过数据带,与实验数据拟合效果良好。图 3(a)中曲线与数据点的偏离程度用标准差 SEE 表示,在表 1 中给出。基于 L-M($C=20$) 的不同温度的标准差较高,曲线偏离较严重。

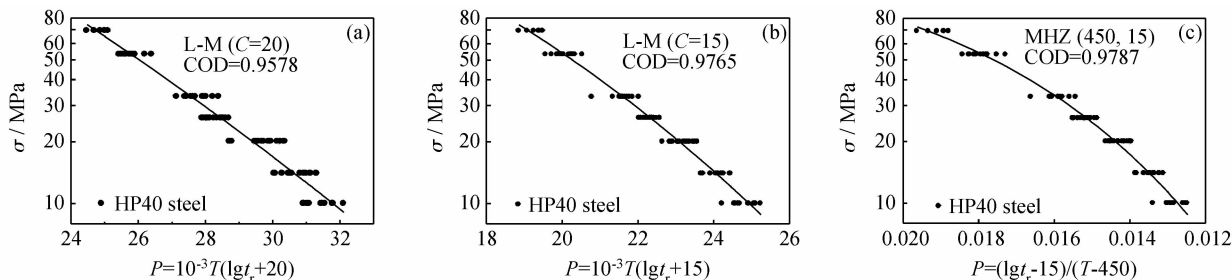


图2 HP40 钢采用不同 TTP 参数拟合的持久性能主曲线

(a) L-M 法 ($C=20$); (b) L-M 法 ($C=15$); (c) M-H 法 ($T_a=450, \lg t_a=15$)

Fig. 2 The master curves of HP40 steel using various TTP parameters

(a) L-M ($C=20$); (b) L-M ($C=15$); (c) MHZ ($T_a=450, \lg t_a=15$)

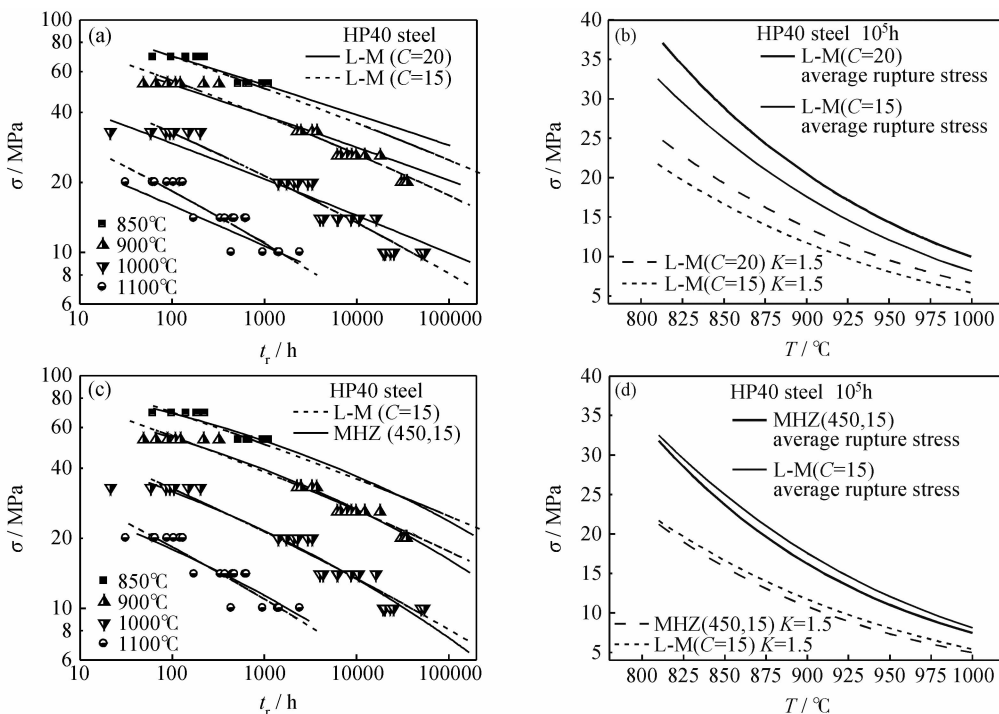


图3 不同 TTP 参数下, HP40 钢持久性能曲线的比较

(a) $\sigma-t_r$ 曲线, L-M ($C=20, C=15$); (b) $\sigma-T$ 曲线, L-M ($C=20, C=15$);

(c) $\sigma-t_r$ 曲线, L-M ($C=20$), MHZ (450, 15); (d) $\sigma-T$ 曲线, L-M ($C=20$), MHZ (450, 15)

Fig. 3 The comparison between creep rupture property curves of Super304 steel by using various TTP parameters

(a) $\sigma-t_r$ curves, L-M ($C=20, C=15$); (b) $\sigma-T$ curves, L-M ($C=20, C=15$);

(c) $\sigma-t_r$ curves, L-M ($C=20$), MHZ (450, 15); (d) $\sigma-T$ curves, L-M ($C=20$), MHZ (450, 15)

主曲线的主要应用之一是在设计许用应力的确定上,工程中常以服役 10^5 h 为条件,进行高温部件的许用应力选择。基于图 2(a), (b) 中的主曲线,若设定 TTP 参数中的断裂时间 t_r 为 10^5 h,就可以获得持久断裂平均应力与温度之间的关系,如果取安全系数为 1.5,则可获得各温度下的许用应力。图 3(b) 显示了基于 L-M 常数 $C=15$ 和 $C=20$ 的平均断裂应力曲线和许用应力曲线,结合图 3(a) 可以看出两条许用应力曲线相差较大,

常数 $C=20$ 的平均断裂应力高于材料的持久性能若在工程中作为强度设计,工程应用时偏危险。

图 3(c), (d) 分别显示了基于 L-M 常数 ($C=15$) 和 MHZ 常数的外推 $\sigma-t_r$ 曲线和许用应力曲线。基于这两种参数的 $\sigma-t_r$ 曲线与数据的标准差在表 1 中给出,图 3(c) 中可以看出两组曲线有所偏差,但总体与实验数据相差不大,一定的误差范围内可以认为两种参数都可关联 HP40 钢的持久性能数据。

2.2 Super304 钢

Super304 钢在超(超)临界核电站中得到广泛应用,采用 L-M(C=15)和 MHZ 常数对其持久性能进行分析得到主曲线、应力断裂时间曲线和许用应力曲

线如图 4 所示。基于 L-M(C=15)的应力断裂时间曲线在温度为 600℃时稍低于数据带,基于 MHZ 常数的 $\sigma-t_r$ 曲线与数据相关性较好,拟合标准差较小,如表 1 所示。总之,两种参数均对 Super304 钢有很好的拟合

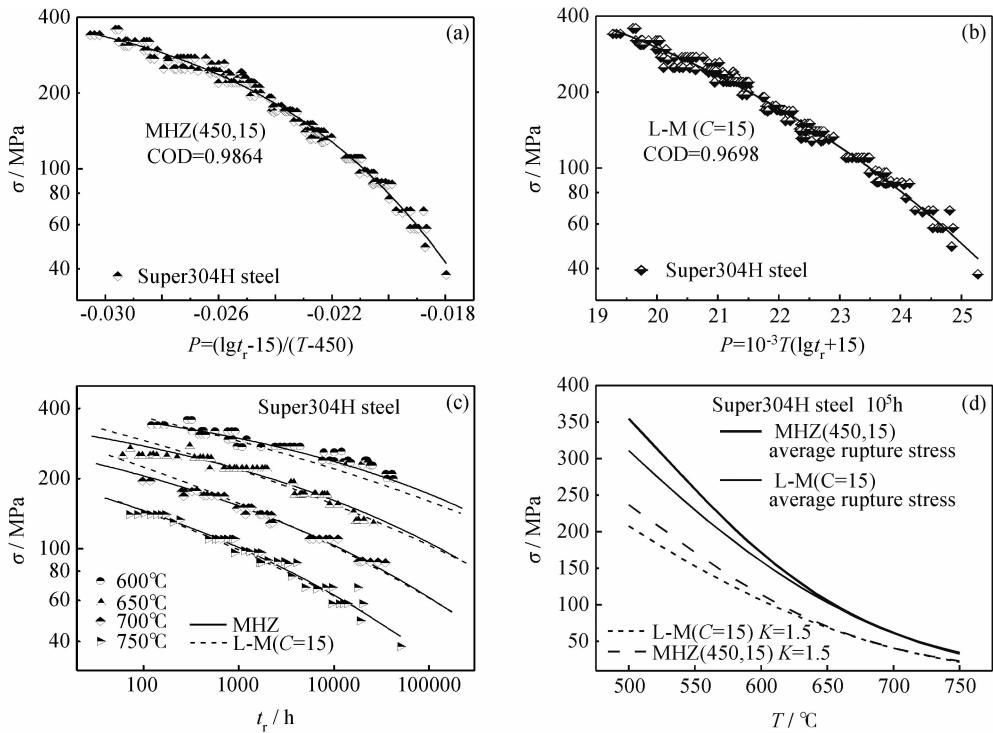


图 4 不同 TTP 参数下,Super304 钢持久性能曲线

(a)主曲线,MHZ(450,15);(b)主曲线,L-M(C=15);(c) $\sigma-t_r$ 曲线;(d) $\sigma-T$ 曲线

Fig. 4 The experimental data and creep rupture property curves of Super304 steel by using various TTP parameters

(a)master curve,MHZ(450,15);(b)master curve,L-M(C=15);(c) $\sigma-t_r$ curves;(d) $\sigma-T$ curves

表 1 图 3 中两种钢在不同温度下外推曲线与实验数据的标准差 SEE

Table 1 The standard error SEE of estimate of the $\sigma-t_r$ curves (in fig. 3) at various temperatures by using various parameters for Super304 and HP40 steels

TTP parameter		850℃	900℃	1000℃	1100℃	Master curve
HP40	L-M(C=20)	0.0228	0.0467	0.0656	0.0710	0.0532
	L-M(C=15)	0.0261	0.0307	0.0499	0.0514	0.0483
	MHZ	0.0230	0.0284	0.0471	0.0512	0.0378
TTP parameter		600℃	650℃	700℃	750℃	Master curve
Super304	L-M(C=15)	0.0441	0.0338	0.0284	0.0406	0.0370
	MHZ	0.0246	0.0273	0.0182	0.0283	0.0247

效果,基于 MHZ 常数拟合精度稍高。

3 MHZ 参数在其他耐热钢中的应用分析

为了检验用统一的 MHZ 常数关联耐热钢持久性能数据的可行性和优势,采用 MHZ 常数对十七种常用耐热钢的持久性能数据进行关联,并与 SH/T3037—2002 标准^[7]建议的 L-M 常数比较,前面已经证实决定系数和标准差在一定程度上反映了参数与实

验数据的关联程度,表 2 列出了采用两种方法拟合实验数据时的决定系数 COD 和标准差 SEE,拟合实验数据由 NIMS 提供。结果表明,只有四种钢采用 L-M 常数拟合的决定系数稍高于 MHZ 常数,且两者相差不大;大部分钢种采用 MHZ 常数拟合决定系数更接近 1,标准差更小,拟合效果优于 L-M 常数。前期研究表明,L-M 常数 C 的取值对持久性能预测精度有较大的影响^[6],为保障预测精度需要选取优化的 L-M 常数。M-H 值能够在较宽的取值范围内取值并能保持较高的

数据关联性。选用不同的 L-M 常数时不同钢种的实验数据和主曲线很难在应力-TTP 参数图中进行比较。选

用统一的 MHZ 常数可以解决这个问题获得更高精度的拟合结果。

表 2 常用耐热钢采用 MHZ 常数和建议 L-M 常数的数据关联结果

Table 2 The analysis results of creep rupture data by using MHZ and L-M constants for widely used heat resistant steels

Heat resistant steel	Recommended L-M constant C	COD	SEE	MHZ constant	COD	SEE	Number of data
0.5Mo (tube)	20	0.9485	0.0489	(450, 15)	0.9497	0.0483	219
0.5Cr-0.5Mo (tube)	20	0.9635	0.0157	(450, 15)	0.9748	0.0455	224
1Cr-0.5Mo	20	0.9763	0.0538	(450, 15)	0.9849	0.0469	407
1Cr-1Mo-0.25V	20	0.9810	0.0360	(450, 15)	0.9845	0.0326	394
1.25Cr-0.5Mo-Si	20	0.9500	0.0716	(450, 15)	0.9590	0.0649	557
2.25Cr-1Mo	20	0.9612	0.0591	(450, 15)	0.9643	0.0566	666
5Cr-0.5Mo	20	0.9870	0.0285	(450, 15)	0.9878	0.0278	232
9Cr-1Mo (tube)	20	0.9692	0.0456	(450, 15)	0.9639	0.0493	267
9Cr-1Mo-V-Nb	30	0.9908	0.0288	(450, 15)	0.9791	0.0437	124
18Cr-8Ni (tube)	15	0.9442	0.0552	(450, 15)	0.9575	0.0480	261
18Cr-12Ni-Mo-middle N-low C	15	0.9685	0.0467	(450, 15)	0.9896	0.0267	108
18Cr-12Ni-Mo	15	0.9639	0.0576	(450, 15)	0.9738	0.0490	455
Fe based 21Cr-32Ni-Ti-Al	15	0.9801	0.0789	(450, 15)	0.9827	0.0623	323
HP40 (tube)	15	0.9765	0.0483	(450, 15)	0.9787	0.0378	94
Super304	15	0.9698	0.0370	(450, 15)	0.9864	0.0246	168
18Cr-10Ni-Ti (tube)	15	0.9397	0.0597	(450, 15)	0.9306	0.0640	267
HK40 (cast tube)	15	0.9559	0.0647	(450, 15)	0.9516	0.0678	239

4 结论

(1)通过选用 L-M 常数 $C=20$ 和 $C=15$ 对 HP40 钢的实验数据进行拟合,结果表明不同的 L-M 常数关联持久性能数据有较大差异,为避免工程危险保证预测精度,需采用 L-M 常数的优化值。

(2)提出了不同耐热钢选用统一的 MHZ 常数关联实验数据,以 HP40 钢和 Super304 钢为例分析基于 MHZ 常数与 L-M 常数拟合曲线与实验数据的相关性,发现 MHZ 常数有较好的拟合效果和预测精度。

(3)选用 MHZ 常数对 17 种耐热钢持久性能数据进行关联,并与 L-M 常数的预测精度进行比较,结果表明大部分钢种选用 MHZ 常数比标准建议的 L-M 常数有更好的预测精度和拟合效果,且统一的 MHZ 常数能够更直观的比较不同耐热钢之间的持久性能,故可以选其作为耐热钢的 TTP 参数。

参考文献

[1] 张俊善. 材料高温变形和断裂[M]. 北京:科技出版社, 2007.

[2] MARAHLEH G,KHEDER A R I, HAMAD H F. Creep life prediction of service-exposed turbine blades[J]. Mater Sci Eng A, 2006, 433(1-2): 305-309.

[3] LARSON F R, MILLER J. A time-temperature relationship for rupture and creep stress[J]. ASME Trans, 1952, 74 (5): 765-771.

[4] YAMAMOTO Y, BRADY M P, LU Z P, et al. Creep-resistant Al_2O_3 forming austenitic stainless steels [J]. Sci, 2007, 316 (5823): 433-436.

[5] RAY A K, TIWARI Y N, ROY P K, et al. Creep rupture analysis and remaining life assessment of 2.25Cr-1Mo steel tubes from a thermal power plant[J]. Mater Sci Eng A, 2007, 454-455: 679-684.

[6] ZHAO J, LI D M, FANG Y Y. Application of Manson-Haferd and Larson-Miller methods in creep rupture property evaluation of heat-resistant steels[J]. J Press Vess-T ASME, 2010, 132(6): 064502.

[7] SH/T 3037-2002, 炼炉厂加热炉炉管壁厚计算[S].

[8] WOO G K, SONG N Y, WOO S R. Application and standard error analysis of the parametric methods for predicting the creep life of type 316LN SS [J]. Key Eng Mater, 2005, 297-300: 2272-2277.

[9] PENNY R K, MARRIOTT D L. Design for creep [M]. London: McGraw-Hill Book Company, 1971. 197-198.

[10] MANSON S S, HAFERD A M. A linear time-temperature relation for extrapolation of creep and stress-rupture data [R]. USA:Lewis Flight Propulsion Lab,NACA, 1953.

[11] Heat Resistant Alloy HP; Alloy Data Sheet [DB]. Kubota Corporation, Japan, 2003.

基金项目:国家自然科学基金资助(51134013;51171037);中央高校基本科研业务资助(DUT10JS06)

收稿日期:2011-11-09;修订日期:2012-04-02

作者简介:刘春慧(1988—),女,硕士,现从事耐热钢寿命预测研究,联系地址:大连市高新园区大连理工大学材料学院材料馆 329 室(116085),E-mail: liu200666039@163.com

通讯作者:赵杰(1964—),男,教授,联系地址:大连市高新园区大连理工大学材料学院材料馆 326 室(116085),E-mail: jiezhao@dlut.edu.cn