

高强钢中最大夹杂物的尺寸估计与疲劳强度预测*

张继明¹⁾ 张建锋²⁾ 杨振国¹⁾ 李守新¹⁾ 惠卫军³⁾ 翁宇庆³⁾

1) 中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室, 沈阳 110016

2) 东北大学理学院, 沈阳 110004

3) 钢铁研究总院, 北京 100081

摘要 描述了两种估计高强钢中最大尺寸夹杂物的方法——统计极值(SEV)和广义 Pareto 分布(GPD)统计方法, 分别利用上述两种方法估计了不同体积的 ADF1 钢中最大夹杂物的特征尺寸, 并根据估计的夹杂物尺寸预测了不同体积的 ADF1 钢疲劳强度, 同时与实验结果进行了对比.

关键词 高强钢, 最大夹杂物尺寸, 统计极值, 广义 Pareto 分布, 疲劳强度

中图法分类号 TG113.25

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2004)08-0846-05

ESTIMATION OF MAXIMUM INCLUSION SIZE AND FATIGUE STRENGTH IN HIGH STRENGTH STEEL

ZHANG Jiming¹⁾, ZHANG Jianfeng²⁾, YANG Zhenguo¹⁾, LI Shouxin¹⁾, HUI Weijun³⁾, WENG Yuqing³⁾

1) Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

2) School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110004

3) Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081

Correspondent: ZHANG Jiming, Tel: (024)83978023, E-mail: jmzhang@imr.ac.cn

Supported by National Key Basic Research and Development Programme of China (No.G19980615)

Manuscript received 2003-09-17, in revised form 2003-12-18

ABSTRACT Two statistic methods, statistics of extreme values (SEV) and generalized Pareto distribution (GPD), which can estimate the size of maximum inclusion in high strength steel, were described. The characteristic sizes of the maximum inclusion in the ADF1 steel with different volumes were evaluated by above two methods, and the fatigue strength estimated was compared with the experimental result.

KEY WORDS high strength steel, size of maximum inclusion, statistics of extreme value, generalized Pareto distribution, fatigue strength

随着炼钢技术的进展,特别是二次净化和控制非金属夹杂物等新技术的应用,大大提高了钢的纯净度,减少了钢中非金属夹杂物的大小和含量. 洁净高强钢中的夹杂物由少量大尺寸夹杂物和一些小尺寸夹杂物组成,然而大尺寸夹杂物由于其低的发生率通常是很难检测到的,特别是对于较大体积的钢件,更是如此. 夹杂物的尺寸大小对承受负载的钢件的可靠性和性能都有重要的影响^[1-3]. 大量的实验结果表明,构件在循环应力作用下,裂纹首先在夹杂物或其它缺陷处萌生,且疲劳失效最可能发生在最大

夹杂物处. 因此,高强钢中最大尺寸夹杂物的预测有助于估计钢的力学性能^[4-7]和根据夹杂物的尺寸估量使用过程中潜在的危险和评估炼钢过程. 所以,预测一定体积钢中最大夹杂物尺寸以及根据夹杂物尺寸来预测其疲劳强度,无论对炼钢和使用都有非常重要的指导意义.

检测钢中夹杂物的方法很多,有金相法、无损检测法(超声波检测和 X 射线探伤等)、夹杂物聚集检测方法(冷坩埚重熔^[8]和电子束重熔^[9])和疲劳方法等. 但是,利用上述方法检测高纯净度高强钢中最大尺寸夹杂物都有一定的难度. 金相法和夹杂物聚集法只能对小体积试样进行检测,对于大体积钢件是无法实现的;而无损检测方法可以对大体积钢件进行检测,但对于尺寸小于 100 μm 的夹杂物很难检测到(高强钢中夹杂物尺寸一般都小于

* 国家新一代钢铁材料重点基础研究发展规划资助项目 G19980615

收到初稿日期: 2003-09-17, 收到修改稿日期: 2003-12-18

作者简介: 张继明,男, 1977 年生, 博士生

100 μm). 直接用疲劳断口表面确定夹杂物尺寸无疑是很准确而宝贵的, 但又是耗时和昂贵的. 最近, Murakami^[10] 应用统计极值 (SEV) 和 Atkinson 等^[11] 用广义 Pareto 分布 (GPD) 统计分析一定体积洁净钢中的最大夹杂物尺寸, 这两种方法已被证明是很有效的, 且比传统方法更方便. 本工作分别利用这两种方法, 对不同体积下高强度 ADF1 钢中最大尺寸夹杂物进行了估计, 根据最大夹杂物尺寸预测了钢的疲劳强度, 并与实验结果进行了对比.

1 实验材料和方法

ADF1 钢由钢铁研究总院相关课题组研制^[12], 是在商业用 42CrMo 钢化学成分的基础上, 采用纯净化熔炼技术降低 O, N, P, S 和 H 等元素的含量, 提高 Mo 含量, 并添加 V, Nb, Ti 微量元素, 材料由大连钢铁集团经电炉冶炼 +LF+VD 热轧成直径 18 mm 棒材, 其拉伸强度在 1400—1500 MPa 之间, 主要化学成分 (质量分数, %) 为: C 0.43, Si 0.12, Mn 0.30, Cr 1.10, Mo 0.50, Nb 0.038, V 0.30, Ti 0.001, P 0.005, S 0.003, O 25×10^{-6} , N 102×10^{-6} , H 1.38×10^{-6} .

采用标准的旋转弯曲疲劳试样, 总长度 160 mm, 试样中心部位直径 8 mm. 实验在 PQ1-6 型旋转弯曲疲劳实验机上进行, 实验环境为室温. 利用 Cambridge 360 扫描电子显微镜测量断口夹杂物尺寸. 夹杂物显微评定试样截取通过疲劳试样轴心的纵断面, 其面积约为 200 mm², 在金相砂纸上磨光, 然后进行抛光, 利用 MEF4A 显微镜 (配置图象分析系统) 观察夹杂物并记录.

1.1 统计极值 (SEV) 方法

统计极值方法已被应用于材料研究的许多相关领域, 例如估算材料表面腐蚀坑的深度, 凝固合金显微结构的杂质最大偏析度^[13], 以及估计合金再结晶过程中晶粒尺寸等^[14]. Murakami^[10] 首先利用该方法估计钢中最大夹杂物的尺寸. 统计极值理论的基本思想是当采集的数据点服从某一分布时, 其最大和最小值则服从一个特定的分布, Gumbel^[15] 给出了其分布函数:

$$G(z) = \exp(-\exp(-(z - \lambda)/\alpha)) \quad (1)$$

式中, $G(z)$ 为尺寸小于或等于 z 的最大夹杂物的概率, α 和 λ 分别为尺寸和位置参数.

在该方法中, 定义 S_0 为标准视场面积, 然后测量每个视场中最大夹杂物的面积, 计算最大夹杂物面积 (A) 平方根 $z = \sqrt{A_{\max}}$, 重复测量计算 N 个标准视场. 第 i 个最大夹杂物尺寸 z_i 的累计概率为:

$$G(z_i) = i/(N + 1) = \exp(-\exp(-(z_i - \lambda)/\alpha)) \quad (2)$$

式中, z_i 是按夹杂物尺寸由小到大顺序排列的第 i 个 $\sqrt{A_{\max,i}}$, 利用夹杂物尺寸 z_i 与对应 $-\ln(-\ln(i/(N+1)))$ 作图, 则直线斜率和截距分别为参数 α 和 λ 值 (见图 1).

为了估计体积为 V 的钢中最大夹杂物尺寸, 定义 T

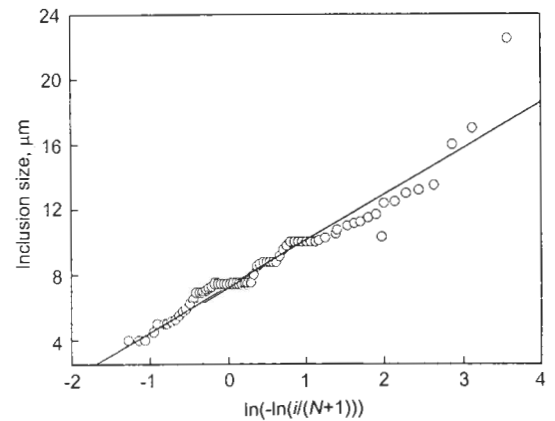


图 1 作图求 SEV 方法估计的参数

Fig.1 Parameters λ and α in Eq.(2) of statistics of extreme values method obtained by plotting

为:

$$T = V/V_0 \quad (3)$$

式中, $V_0 = h/S_0$ 为单个标准视场体积, $h = (\sum \sqrt{A_{\max,i}})/N$ 为测量 $z_i = \sqrt{A_{\max,i}}$ ($i=1, \dots, N$) 的平均值. 则体积 V 中最大夹杂物尺寸 z_V 通过解方程 $G(z_V) = 1 - 1/T$ 给出, 即:

$$(z_V - \lambda)/\alpha = -\ln(-\ln(T - 1)/T) \quad (4)$$

另外, 参数 λ 和 α 值也可以由似然函数求极值方法获得^[16], 似然函数方法被证明为最有效的估计^[17], 因为其误差最小. 似然函数的概率密度方程为:

$$L = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\alpha} \exp \left\{ - \left(\frac{z_i - \lambda}{\alpha} + \exp \left(\frac{-(z_i - \lambda)}{\alpha} \right) \right) \right\} \quad (5)$$

本实验中, S_0 取放大 400 倍观察视场的面积, 约 0.0356 mm², 从 10 个不同试样中随机选取 80 个视场进行观察, 为了保证金相所观察的为夹杂物, 同时利用 SEM 能谱分析进行确认.

1.2 广义 Pareto 分布 (GPD) 方法

广义 Pareto 分布方法是统计分布的一个标准族, 适用于对超过某一阈值值的典型数据进行统计分析. 最近, Atkinson 等人^[11] 将该方法应用于洁净钢中最大尺寸夹杂物的预测. 假设存在一阈值 u , x 为大于该阈值的夹杂物尺寸 (\sqrt{A}). 则大于阈值 u 的夹杂物尺寸 (小于或等于 x) 的概率 $F(x)$ 分布函数^[18] 由广义 Pareto 分布给出:

$$F(x) = 1 - (1 + \xi(x - u)/\sigma')^{-1/\xi} \quad (6)$$

式中, $\sigma' (> 0)$ 为尺寸参数, ξ 为形状参数. 如果 $\xi > 0$, 则 $0 \leq x - u \leq \infty$; 如果 $\xi < 0$, 则

$0 \leq x - u \leq -\sigma'/\xi$; 当 $\xi=0$ 时, 认为 $F(x)$ 达到极限, 即 $F(x) = 1 - \exp(-(x - u)/\sigma')$ 为指数分布.

方程 (6) 中阈值 u 的选取是一个重要部分, 因为夹杂物尺寸小于 u 的数据在分析过程中将被忽略, 所以节省时间和人力. 阈值 u 可由夹杂物尺寸超过 u 的余数均值对不同阈值 u 作图获得^[18], 若超过某阈值 u 的部分接近线性分布, 则, 其纵轴截距为 $\sigma'/(1 - \xi)$, 斜率为 $\xi/(1 - \xi)$ (见图 2). 参数 σ' 和 ξ 值也可由求似然函数的最大值方法获得, 对应方程 (6) 的似然函数的概率密度方程为

$$L = \prod_{i=1}^k \frac{1}{\sigma'} \left\{ 1 + \frac{\xi(x_i - u)}{\sigma'} \right\}^{-(1/\xi)-1} \quad (7)$$

式中, x_i 为大于阈值 u 的夹杂物尺寸. 实验中发现对于钢来说, ξ 一般 < 0 , 最大夹杂物尺寸分布对 u 的选取不敏感^[11].

广义 Pareto 分布方法所需数据为大于某一特定尺寸夹杂物的数量和尺寸 (见图 3). 在体积 V 中, 尺寸大小超过 x 的夹杂物数量的期望值等于体积 V 中超过 u 的

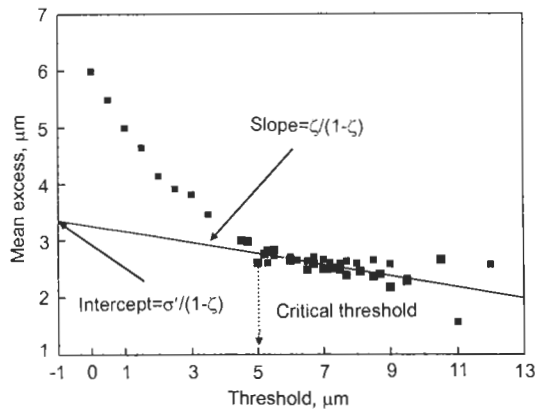


图 2 GPD 估计方法的参数确定

Fig.2 Determination of parameters in generalized Pareto distribution estimation

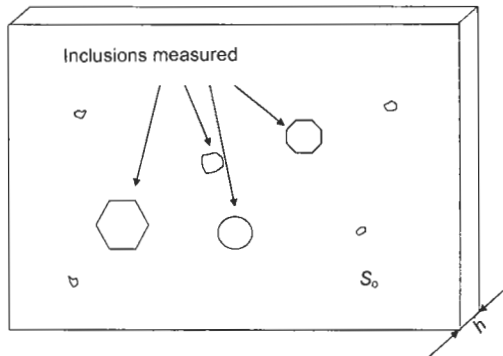


图 3 GPD 方法估计的夹杂物测量

Fig.3 Illustration of inclusions measured for the GPD method

期望值. 假定夹杂物尺寸大于 u , 也就是大于 x , 则其最后的概率可由方程 (6) 给出. 如果 $N(u)$ 表示单位体积内大于 u 的期望值, 夹杂物尺寸 x_V 系体积为 V 钢中唯一最大夹杂物尺寸 (假定钢中极大尺寸夹杂物只有一个), 则

$$N(u)V \cdot (1 - F(x_V)) = 1 \quad (8)$$

结合方程 (6), 体积为 V 的钢中最大夹杂物特征尺寸 x_V 可由下式估算:

$$x_V = u - \frac{\sigma'}{\xi} \{1 - (N_V(u)V)^\xi\} \quad (9)$$

$N_V(u)$ 可以根据抛光截面夹杂物平面尺寸运用 Woodhead^[18] 分析估算. 如果 $\xi \leq 0$, 且钢体积 V 非常大, 则 $(N_V(u)V)^\xi \ll 1$, 由式 (9) 得:

$$x_V = u - (-\sigma'/\xi) \quad (10)$$

因此, $u - (\sigma'/\xi)$ 为估计夹杂物尺寸的上限, 亦即找到夹杂物尺寸大于或等于 $u - (\sigma'/\xi)$ 的概率为零.

本实验中随机观察了 80 个视场, 同时对夹杂物进行了 SEM 能谱分析确认.

最大夹杂物特征尺寸估计值的置信区间是由似然函数方法得到的^[19], 通过不同的最大夹杂物的特征尺寸的给定值计算相应的似然函数 (方程 (5) 和 (7)) 的最大值, 获得的曲线称为似然函数曲线, 似然函数的取值区间即为最大夹杂物的特征尺寸的取值范围 (图 4), 具体步骤就是通过似然函数最大值的自然对数与对应的可能的最大夹杂物的特征尺寸作图, 曲线峰值即为最大夹杂物特征尺寸的估计值, 自峰值两边各降低 1.92 即为最大夹杂物特征尺寸估计值的 95% 的置信区间.

与传统方法相比, 统计极值方法可估计比观察视场区域更大面积的最大尺寸夹杂物, 最大尺寸夹杂物的预测结果可作为炼钢过程中减小夹杂物尺寸的数据依据. 此外, 统计极值方法也适用于不同类型高强钢的成分设计. 然而,

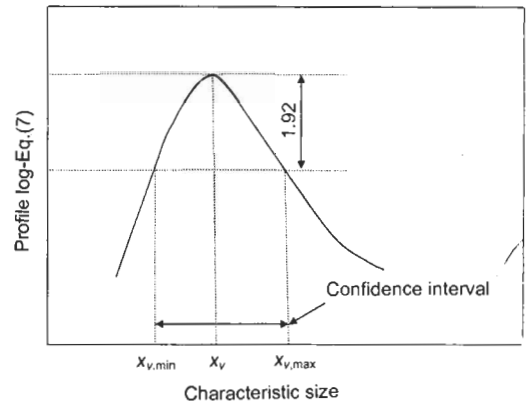


图 4 最大夹杂物尺寸估计值的 95% 置信区间示意图

Fig.4 Illustration of likelihood function (L) curve, giving an estimation of maximum inclusion size with 95% confidence interval

由于该方法估计的夹杂物尺寸不存在上限值, 夹杂物尺寸与钢的体积成线性关系, 这种情况在炼钢过程中并不存在. 广义 Pareto 分布方法估计的最大特点是最大夹杂物尺寸存在一上限值, 这与实际情况比较符合, 最大夹杂物尺寸上限的存在, 对于炼钢和工程应用是一个重要的工具, 有利于估计找到大于临界尺寸夹杂物的概率和估计使用过程中夹杂物引起的潜在危害. 这一点对于要求钢中夹杂物尺寸必须小于某一特定尺寸的特殊用途的钢来说是比较重要的.

1.3 疲劳强度估计

高强钢的疲劳强度值一般分散性较强^[20]. 高强钢中疲劳裂纹源并不总是在表面, 而在距表面一定的深度, 有时形成所谓的鱼眼结构, 很多实验已经表明夹杂物对高强钢疲劳强度有非常重要的影响^[21]. 最近, Murakami 等人^[22]通过大量试验和数据分析确立了高强钢疲劳强度与非金属夹杂物尺寸的关系, 即:

$$\sigma_w = C/(\sqrt{S})^{1/6} \quad (11)$$

式中, σ_w 为试样的疲劳强度, MPa; C 是与基体的硬度和夹杂物位置相关的系数; S 为起裂夹杂物及其周围光学“暗区”的面积, μm^2 .

2 实验结果与分析

2.1 最大夹杂物特征尺寸估计

表 1 为利用作图确定的统计极值和广义 Pareto 分布方法估计的参数值及其误差, 图 5 为利用 SEV 和 GPD 方法估计的不同体积的 ADF1 钢中最大夹杂物尺寸与实验结果比较. 结果表明, 利用 SEV 方法估计的最大夹杂物的特征尺寸与 ADF1 钢体积成线性关系, 体积越大, 其可能含有的极大夹杂物尺寸越大, 最大夹杂物尺寸随着体积的增加是无限增大的, 而 GPD 方法估计的主要特征之一就是当形状参数 ξ 为负值时, 估计的最大夹杂物尺寸存在一个极限值, 即使钢的体积增加到无限大, 其夹杂物尺寸都不会超过该极限值. 图中实验的数据是利用旋转弯曲疲劳试验得到的, 其夹杂物都是断裂面上夹杂物中尺寸最大的^[12], 这些夹杂物大都在 SEV 和 GPD 方法估计的置信区间内. 由于旋转弯曲疲劳断裂都是发生在中心部位 1 mm 内, 并且断口上夹杂物都出现在距试样表面约 1 mm 范围内 (因回转弯曲疲劳的原因), 故疲劳与断裂的

表 1 ADF1 钢 SEV 和 GPD 方法估计的参数及其标准差
Table 1 Estimated parameters (with their standard error) from the SEN and GPD methods for ADF1 steel

Method	Parameter	Value
SEV	$\lambda, \mu\text{m}$	7.29296(0.21)
	$\alpha, \mu\text{m}$	2.82871(0.1678)
GPD	$\sigma', \mu\text{m}$	2.901553(0.43)
	ξ	-0.107849(0.09)
	$u, \mu\text{m}$	5

体积估算为该环形面积及其厚度为 1 mm 的体积.

实际上, ADF1 钢最大夹杂物尺寸的估计是在测量数据的基础上外推得到的, 估计的精度依赖于被测试样的数量和用于外推的钢的体积, 外推体积越大, 其置信区间宽度越大, Shi 等^[23]通过计算机模拟也得到了相似的结果. 因此, 最大夹杂物尺寸的估计值也存在某种程度的不确定性.

2.2 疲劳强度估计

图 6 为根据不同体积下 ADF1 钢最大夹杂物尺寸估计值, 利用式 (11) 对其疲劳强度进行了预测并与实验获得的 ADF1 钢疲劳强度及其误差进行比较. 由于 ADF1 钢体积的增加, 导致其最大夹杂物尺寸增大, 从而使其疲劳强度降低. 而 ADF1 钢实验疲劳强度^[12]则介于统计极值和广义 Pareto 分布方法估计的强度值之间.

通过实验与估计值的对比分析表明, 统计极值方法给

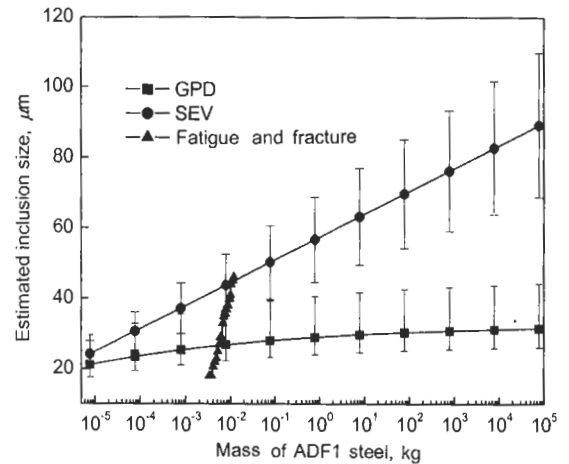


图 5 SEV 和 GPD 方法估计不同体积 ADF1 钢中最大夹杂物特征尺寸与实验结果比较

Fig.5 Compared characteristic sizes of the maximum inclusion in different volumes of ADF1 steel by the SEV and GPD method with experimental results

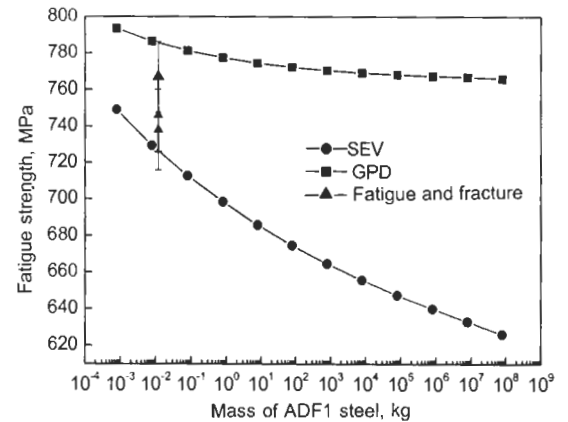


图 6 不同体积的 ADF1 钢疲劳强度预测值和实验结果比较

Fig.6 Compared estimations of fatigue strength in different volumes of ADF1 steel with fatigue strength obtained by experiment

出较大的夹杂物尺寸分布和较低的疲劳强度估计, 而广义 Pareto 分布方法给出偏小的夹杂物尺寸和略高的疲劳强度估计, 也即, 统计极值估计给出疲劳强度的估计下限, 广义 Pareto 分布估计给出疲劳强度的估计上限, 而实验结果表明, ADF1 钢疲劳强度则介于这两种方法估计的上下限之间 (见图 6). 因此, 这二者结合才能给出比较合理的疲劳强度估计范围.

利用统计方法 (SEV 和 GPD 方法) 估计不同体积下的钢中最大夹杂物尺寸, 对于炼钢和工程应用都有很重要的实际意义. 可以作为钢生产过程中减小夹杂物大小的数据基础. 用于生产过程中控制和提高钢的质量; 也可用于高强度钢的结构设计, 有利于对构件寿命的估计. 使用者可根据估计的夹杂物大小估计钢的疲劳强度和其它力学性能, 排除使用过程中的潜在危害.

3 结论

统计极值和广义 Pareto 分布方法可以有效的估计较大体积下 ADF1 钢中的最大夹杂物特征尺寸.

ADF1 钢的疲劳强度预测与实验结果表明, 随着 ADF1 钢体积增大, 导致钢中最大夹杂物尺寸增大, 疲劳强度降低. 与实验结果相比, 统计极值方法给出较大夹杂物尺寸分布和较低的疲劳强度估计, 而广义 Pareto 分布给出较小的夹杂物尺寸和略高的疲劳强度估计, 二者结合才能给出较合理的估计范围.

本工作设计分析是在李广义与姚戈两位老师的指导下完成的, 特表示感谢!

参考文献

- [1] Goto H, Miyazawa K, Tanaka T. *ISIJ Int*, 1995; 5: 286
- [2] Uesuigi T. *Trans ISIJ*, 1988; 11: 893

- [3] Shih T Y, Araki T. *Trans Iron Steel Instit Jpn*, 1973; 13: 11
- [4] Murakami Y, Endo M. *Eng Fract Mech*, 1983; 17: 1
- [5] Wu C Z, Shih T S. *Mater Trans JIM*, 2003; 44: 995
- [6] Murakami Y, Endo M. *Int J Fat*, 1994; 16: 163
- [7] Yates J R, Shi G, Atkinson H V, Sellars C M, Anderson C W. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 2002; 25: 667
- [8] Barnard L, Brooks R F, Quested P N, Mills K C. *Ironmak Steelmak*, 1993; 20: 344
- [9] Quested P N, Hayes D W, Mills K C. *Mater Sci Eng*, 1993; A173: 369
- [10] Murakami Y. *J Res Natl Inst Stand Technol*, 1994; 99: 345
- [11] Atkinson H V, Shi G. *Progress Mater Sci*, 2003; 48: 457
- [12] Yang Z G, Zhang J M, Li S X, Chu Z M, Hui W J, Weng Y Q. *Acta Metall Sin*, 2004; 40: 367
(杨振国, 张继明, 李守新, 褚作明, 惠卫军, 翁宇庆. 金属学报, 2004; 40: 367)
- [13] Scarf P A, Laycock P J. *J Res Natl Inst Technol*, 1994; 99: 313
- [14] Murakami Y, Uemura Y, Kawakami K. *Trans Jpn Soc Eng*, 1989; 55: 58
- [15] Gumbel E J. *Statistics of Extreme*, New York and London: Columbia University Press, 1958
- [16] Shi G, Atkinson H V, Sellars C M, Anderson C W. *Ironmak Steelmak*, 1999; 26: 239
- [17] Beretta S, Murakami Y. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 1998; 21: 1049
- [18] Shi G, Atkinson H V, Sellars C M, Anderson C W. *Acta Mater*, 1999; 47: 1455
- [19] Walshaw D. *J Res Natl Inst Stand Technol*, 1994; 99: 399
- [20] Bathias C. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 1999; 22: 559
- [21] Miller K J, O'donnell W J. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 1999; 22: 545
- [22] Murakami Y, Usuki H. *Int J Fat*, 1989; 5: 299
- [23] Shi G, Atkinson H V, Sellars C M, Anderson C W, Yates J R. *Acta Mater*, 2001; 49: 1813