

## 2 000 MPa 高强度钢的超高周疲劳破坏行为

赵海民<sup>1</sup> 陈思联<sup>1</sup> 郝立群<sup>2</sup> 惠卫军<sup>1</sup> 董瀚<sup>1</sup> 翁宇庆<sup>1,3</sup>

(1 钢铁研究总院先进钢铁材料技术国家工程研究中心,北京 100081;

2 云南大学,昆明 650091; 3 中国金属学会,北京 100711)

**摘要** 通过 USF-2000 超声波疲劳试验机研究了 500 kg 真空感应炉 + 电渣重熔冶炼的 2 000 MPa 高强度钢 (0.45C, 2.0Si, 0.9Cr, 0.001S, 0.005P, 0.026Al, 0.0015O, 0.0028N) 在共振频率 20 kHz、载荷比  $R = -1$ 、共振间隙 150 ms 时的超高周疲劳破坏行为。结果发现,疲劳裂纹大部分起源于钢中非金属夹杂物(夹杂平均尺寸 12.3  $\mu\text{m}$ ),钢的疲劳强度和寿命随夹杂物增大而降低;内部夹杂物引起的疲劳破坏往往呈鱼眼型;随疲劳断口裂纹源夹杂物处应力场强度因子  $\Delta K_{inc}$  的减小,钢的疲劳寿命  $N_f$  增加。

**关键词** 高强度钢 非金属夹杂物 超高周疲劳 破坏行为

## Failure Behavior of Ultra-high Cycle Fatigue of a 2 000 MPa Grade High Strength Steel

Zhao Haimin<sup>1</sup>, Chen Silian<sup>1</sup>, Hao Liqun<sup>2</sup>, Hui Weijun<sup>1</sup>, Dong Han<sup>1</sup> and Weng Yuqing<sup>1,3</sup>

(1 National Engineering Research Center of Advanced Steel Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;

2 Yunnan University, Kunming 650091; 3 The Chinese Society for Metals, Beijing 100711)

**Abstract** The failure behavior of ultra-high cycle fatigue of a 2 000 MPa grade high strength steel (0.45C, 2.0Si, 0.9Cr, 0.001S, 0.005P, 0.026Al, 0.0015O, 0.0028N) melted by 500 kg vacuum induction furnace + electro-slag remelting has been studied by USF-2000 ultrasonic fatigue test machine with resonant frequency 20 kHz, load ratio  $R = -1$ , resonant gap 150 ms. Results found that the fatigue crack originated mostly from non-metallic inclusions (inclusion average size 12.3  $\mu\text{m}$ ); with increasing inclusion size both fatigue strength and fatigue life of steel decreased; fatigue failure area caused by inner inclusion presented fish-eye shape; and with decreasing the stress intensity factor range  $\Delta K_{inc}$  at fatigue crack originated site of inclusion, the fatigue life  $N_f$  of steel increased.

**Material Index** High Strength Steel, Non-metallic Inclusion, Ultra-high Cycle Fatigue, Failure Behavior

传统的疲劳数据往往局限于  $10^7$  周次以下,然而许多部件需要承受  $10^7$  周次以上的超高周循环载荷而不发生断裂<sup>[1]</sup>。材料的超高周疲劳(VHCF)是目前国际疲劳界的一个研究热点,自 1998 年起先后召开了四届国际会议。过去,由于受实验设备的限制,研究材料的超高周疲劳性能非常困难,比如常规疲劳试验(频率约为 100 Hz)完成  $10^9$  周次疲劳寿命试验需要 115 天。近年来,利用压电磁致伸缩原理和高能超声波谐振技术而开发的超声波疲劳试验方法开始应用于疲劳断裂研究,使得每个疲劳试件达到  $10^9$  周次疲劳仅需约 14 h,大大节省了疲劳试验的时间和资金。

高强度钢的冶金质量特别是夹杂物对其高周疲劳破坏行为有十分显著的影响,疲劳断裂通常由夹杂物等内部缺陷引起<sup>[2]</sup>。对于超高周疲劳,夹杂物等内部缺陷的影响更为显著。因此,要提高钢的强度和实现长寿命化,就必须克服由内部缺陷所引起的这种内部疲劳破坏。采用 500 kg 真空感应炉 +

电渣重熔工艺冶炼能够明显地细化钢中的非金属夹杂物,有望改善高强度钢的超高周疲劳性能。对此,本文利用超声波疲劳试验机研究了一种真空感应炉 + 电渣重熔工艺冶炼的 2 000 MPa 级高强度钢的超高周疲劳破坏行为,并结合断裂力学理论对其疲劳破坏机理进行了探讨。

### 1 试验材料与方法

试验钢的化学成分(%)为:0.45C、2.0Si、0.8Mn、0.9Cr、0.001S、0.005P、0.026Al、0.0015O、0.0028N。将  $\Phi 16$  mm 棒材加热到 850  $^{\circ}\text{C}$ ,保温 1 h 后炉冷,然后加工成标准拉伸试样( $l_0 = 5d_0$ ,  $d_0 = 5$  mm)和超声波疲劳试样(图 1)。上述试样在 925  $^{\circ}\text{C}$  保温 30 min 后油淬,然后在 350  $^{\circ}\text{C}$  保温 90 min 后空冷。对超声波疲劳试样,采用 1 000# 的细砂纸沿轴向对中心细直径处进行机械抛光处理,去掉表面的横向加工刀痕。

超高周疲劳试验在岛津 USF-2000 型超声波疲劳试验机上进行,试样共振频率为 20 kHz,载荷比

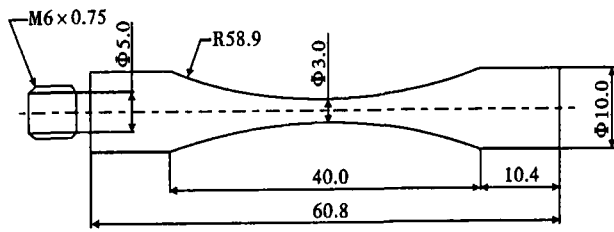


图 1 超高周疲劳试验试样尺寸

Fig. 1 Dimension of specimen for ultra-high cycle fatigue test

$R = -1$ , 共振间歇为 150 ms, 试验时采用压缩空气冷却, 试验环境为室温。在日立 S-4300 型场发射扫描电镜(SEM)下观察疲劳断口形貌, 用 SEM 上附带的 E-DAX 能谱仪分析断口夹杂物的成分。在 AG-100kNE 型材料试验机上按照国家标准 GB228-1987 进行拉伸试验。

## 2 试验结果及分析

试验钢的微观组织为回火马氏体, 拉伸强度为 2 070 MPa, 伸长率为 9%, 硬度为 HV549。图 2 为试验钢的超声波疲劳特征 S-N 曲线。可见, 随着外加应力幅的减小, 试验钢的 S-N 曲线连续下降。在大于  $10^7$  周次的超高周疲劳区, 仍有大量的试样发生疲劳断裂; 在  $10^9$  循环周次内, 无明显的疲劳极限。

在 SEM 下对试验钢的所有疲劳断口进行了观察, 对裂纹源的统计结果见表 1。可见, 除个别试样外, 其余试样的疲劳断裂均起裂于内部夹杂物(图 3a)。对于断裂周次较高(通常大于  $10^6$ )的疲劳断口, 在夹杂物的周围往往存在一个粗糙的粒状亮区(图 3b), 在高倍下该区域比较粗糙(图 3c)。这类粗糙区域的存在是高周疲劳, 特别是超高周疲劳内部起裂断口中一个比较普遍的现象, 对于其称呼不尽一致<sup>[3,4]</sup>, 本文称其为 GBF(Granular bright facet)区。到目前为止, GBF 区的形成机理仍不十分清

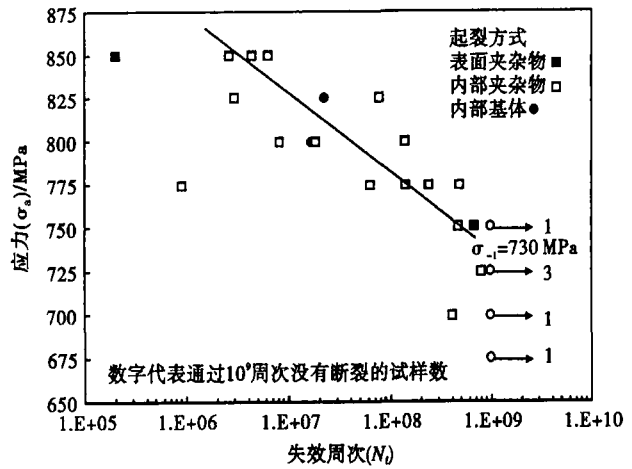


图 2 试验钢超声波疲劳应力-循环次数(S-N)曲线

Fig. 2 Stress number (S-N) curve of ultrasonic fatigue of test steel

表 1 试样中疲劳裂纹源区夹杂物数量和尺寸的统计结果  
Table 1 Statistical results of inclusion number and size in field of fatigue crack origination site

疲劳源区夹杂物数量/个(应力范围/MPa)		夹杂物尺寸范围/ $\mu\text{m}$	夹杂物平均尺寸/ $\mu\text{m}$
内部夹杂	表面夹杂	内部基体	夹杂物类型
17(700 ~ 850)	2(750 ~ 850)	2(800 ~ 825)	$\text{Al}_2\text{O}_3$
			4.2 ~ 27.5
			12.3

楚, 它是高强度钢超高周疲劳研究的一个重要课题。进一步的能谱分析表明, 裂纹源处的夹杂物主要含 Al 和 O 等元素(图 3d), 为复合氧化物夹杂。

图 4 为试验钢疲劳源夹杂物的尺寸与分布情况。可见, 对于拉压疲劳, 在疲劳试样的整个横截面上均有夹杂物引起疲劳断裂, 裂纹源夹杂物的尺寸大多小于  $15 \mu\text{m}$ , 但亦存在个别粗大的夹杂物。

## 3 讨论

Murakami 等<sup>[1]</sup>通过大量试验和分析提出了预测高强度钢疲劳极限的关系式:

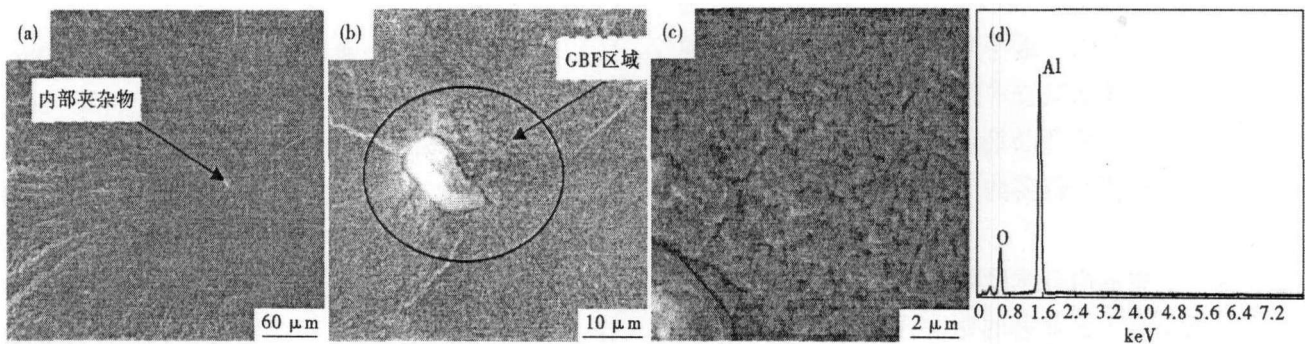


图 3 试验钢疲劳裂纹源夹杂物(a), 夹杂物引起鱼眼型破坏(b), 夹杂物周围粗糙亮区(c)及典型夹杂物能谱(d), SEM,  $\sigma_a = 825 \text{ MPa}$ ,  $N_f = 7.98 \times 10^7$

Fig. 3 Inclusion at fatigue crack origination site in test steel (a), fish-eye type failure caused by inclusion (b), rough granular bright facet around inclusion (c), and energy spectrum of typical inclusion (d), SEM,  $\sigma_a = 825 \text{ MPa}$ ,  $N_f = 7.98 \times 10^7$

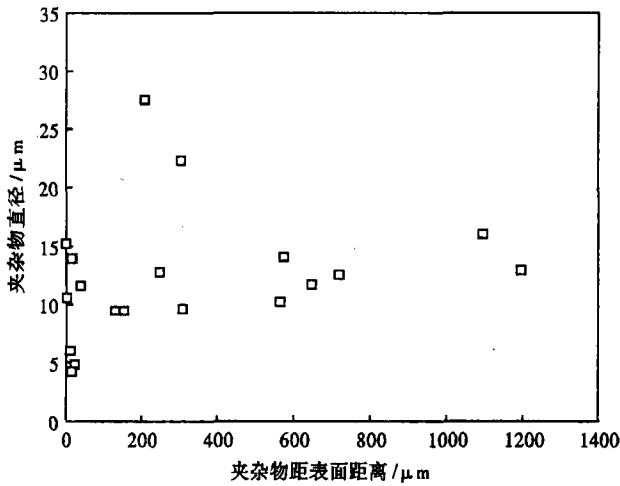


图4 试验钢超声波疲劳断口裂纹源中夹杂物的尺寸及其分布

Fig.4 Size and distribution of inclusions at ultrasonic fatigue failure crack site of test steel

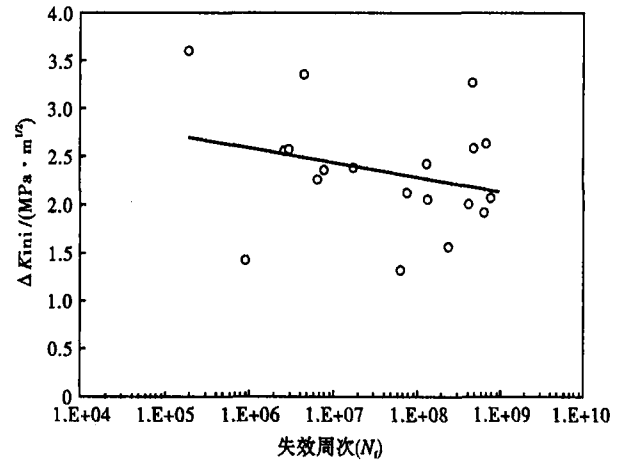


图5 试验钢疲劳断口裂纹源夹杂物处的应力强度因子  $\Delta K_{ini}$  与试样疲劳寿命  $N_f$  之间的关系

Fig.5 Relationship between stress intensity factor range  $\Delta K_{ini}$  at inclusion of fatigue fracture origination and fatigue life  $N_f$  of test steel

$$\sigma_{-1} \approx C(HV + 120) / (\sqrt{area_i})^{1/6} \cdot [(1 - R) / 2]^\alpha \quad (1)$$

式中:HV- 试样的维氏硬度;  $area_i$ - 沿最大主应力方向夹杂物的投影面积;R- 应力比;  $\alpha = 0.226 + HV \times 10^{-4}$ ; C- 与夹杂物等缺陷位置有关的常数。从式(1)可知,减小内部缺陷(夹杂物)的尺寸能够显著提高高强度钢的疲劳强度。

试验用高强度钢超高周疲劳破坏主要起裂于钢中的粗大夹杂物。在疲劳破坏的过程中,夹杂物周围的应力场强度因子是一个重要参数,它与夹杂物尺寸关系密切。Murakami等<sup>[5]</sup>分别给出了表面夹杂物和内部夹杂物的应力场强度因子  $\Delta K_{inc,s}$ 、 $\Delta K_{inc,i}$  的计算公式:

$$\Delta K_{inc,s} = 0.65\sigma \sqrt{\pi \sqrt{area_{inc,s}}} \quad (2)$$

$$\Delta K_{inc,i} = 0.50\sigma \sqrt{\pi \sqrt{area_{inc,i}}} \quad (3)$$

式中:  $\sigma$ - 夹杂物所在位置的应力/MPa;  $area_{inc,s}$ 、 $area_{inc,i}$ - 分别为表面夹杂物和内部夹杂物在断裂面上的投影面积/ $\mu m^2$ 。

图5为计算的试验钢疲劳断口裂纹源夹杂物处的应力场强度因子  $\Delta K_{in}$  与试样疲劳寿命  $N_f$  之间的关系。可见,  $\Delta K_{in}$  与疲劳寿命有密切的相关性,即随  $\Delta K_{in}$  降低,疲劳寿命  $N_f$  增加。

可见,高强度钢的疲劳强度和疲劳寿命均与钢中夹杂物的尺寸有关。采用真空感应炉+电渣重熔工艺冶炼细化了钢中的夹杂物,可以有效地推迟疲劳裂纹的萌生,进而提高钢的疲劳强度和疲劳寿命。

#### 4 结论

(1) 试验钢超高周疲劳裂纹仍绝大部分起裂于钢中的非金属氧化物夹杂,且试验钢的疲劳强度和疲劳寿命均随夹杂尺寸的增大而降低。

(2) 对于内部夹杂物引起的疲劳破坏,在低应力幅、高循环周次(约大于  $10^6$  cyc)下,夹杂物周围往往存在粗糙的粒状区域(GBF)。随着疲劳断口裂纹源夹杂物处应力场强度因子  $\Delta K_{inc}$  的减小,疲劳寿命  $N_f$  增加。

国家重点基础研究发展规划(973)基金资助项目(2004CB619104)

#### 参考文献

- Murakami Y, Nomoto T, Ueda T. Factors Influencing the Mechanism of Superlong Fatigue Failure in Steels. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1999, 22: 581
- 惠卫军, 赵海民, 聂义宏, 等. 洁净度对高强度钢高周和超高周疲劳破坏行为的影响. 2007 中国钢铁年会论文集, 1-343
- Murakami Y, Yokoyama N N, Nagata J. Mechanism of Fatigue in Ultralong Life Regime. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 2002, 25: 735
- Sakai T, Sato Y, Oguma N. Characteristic S-N Properties of High-carbon-chromium-bearing Steel under Axial Loading in Long-life Fatigue. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 2002, 25: 765
- Murakami Y, Kodama S, Konuma S. Quantitative Evaluation of Effects of Non-metallic Inclusions on Fatigue Strength of High Strength Steels (I). *Int J Fatigue*, 1989, 11(5): 291

赵海民(1982-), 男, 硕士研究生, 2005年内蒙古科技大学毕业, 高强度弹簧钢的超高周疲劳断裂行为研究。

收稿日期: 2007-11-12