

60Si2CrVA 高强度弹簧钢的超高周疲劳破坏行为*

赵海民¹ 惠卫军¹ 聂义宏¹ 翁宇庆^{1,2} 董瀚¹

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. 中国金属学会 北京 100711

摘 要 进行超声波疲劳和疲劳裂纹扩展速率实验,研究了 3 种 60Si2CrVA 弹簧钢的超高周疲劳破坏行为。结果表明,60Si2CrVA 弹簧钢的超高周疲劳性能主要与其夹杂物的尺寸有关,即随着夹杂物尺寸的减小,钢的疲劳寿命和疲劳强度均逐渐提高。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)条件下,在夹杂物周围的鱼眼处往往存在粗糙的粒状区域(GBF)。对于 A-60 钢,随着疲劳源夹杂物处应力场强度因子幅的减小,疲劳寿命增加;而 GBF 处的应力场强度因子幅并不随疲劳寿命变化而变化,基本为一常数(平均值为 $4.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$),与疲劳裂纹扩展门槛值($4.3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)接近。

关键词 金属材料, 60Si2CrVA 弹簧钢, 超高周疲劳, 疲劳裂纹扩展速率, 非金属夹杂物

分类号 TG142, TG115

文章编号 1005-3093(2008)05-0526-07

Very high cycle fatigue fracture behavior of high strength spring steel 60Si2CrVA

ZHAO Haimin¹ HUI Weijun^{1**} NIE Yihong¹ WENG Yuqing^{1,2} DONG Han¹

1. National Engineering Research Center of Advanced Steel Technology,

Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081

2. The Chinese Society for Metals, Beijing 100711

* Supported by National Key Basic Research and Development Program of China No.2004CB619104.

Manuscript received October 22, 2007; in revised form May 15, 2008.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(010)62182791, E-mail: wjhui@sina.com

ABSTRACT Very high cycle fatigue fracture behaviors of three heats commercial spring steels 60Si2CrVA were studied by using ultrasonic fatigue test and fatigue crack propagation rate test. Experimental results show that significant difference of the very high cycle fatigue properties of the tested steels were mainly caused by the difference of inclusion size. That is, both fatigue life and fatigue strength increase with decreasing the inclusion size. In the case of internal inclusion-induced fractures at cycles beyond 1×10^6 , a fish-eye area was usually seen on the fracture surface, and inclusion was usually observed inside the fish-eye and a granular bright facet (GBF) was found in the vicinity around the inclusion. Further investigation of heat A-60 reveals that the stress intensity factor range at crack initiation site of inclusion has the trend to decrease gradually with increasing the number of cycles to failure N_f , while that at crack initiation site of GBF is almost constant with N_f with an average value of about $4.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, which is very close to the fatigue crack propagation threshold of about $4.3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

KEY WORDS metallic materials, 60Si2CrVA spring steel, very high cycle fatigue, fatigue crack propagation rate, non-metallic inclusion

疲劳破坏是弹簧的主要失效形式。现代弹簧经常面临高频低幅载荷,疲劳工作寿命往往超过传统意义上的 10^7 周次,可达到 10^9 周次以上。因此,进一

步提高弹簧的疲劳寿命和开发长寿命高强度弹簧钢是弹簧钢研究和开发的主题之一^[1-3]。过去,由于实验设备的限制,常规疲劳试验(频率约为 100 Hz)完成 10^9 次循环疲劳寿命实验需要 115 天。近年来,超声波疲劳实验方法应用于疲劳断裂研究,其工作频率一般为 15-30 kHz,使得每个疲劳试件达到 10^9 周次疲劳只需约 14 h^[4]。这不但缩短了疲劳实验的时间,

* 国家重点基础研究发展规划 2004CB619104 资助项目。

2007 年 10 月 22 日收到初稿;2008 年 5 月 15 日收到修改稿。

本文联系人:惠卫军,教授

而且可以测得常规疲劳实验很难得到的 10^9 周次甚至 10^{10} 周次的超高周疲劳性能. 对于通常认为存在疲劳极限的高强度钢, 在超过 10^7 周次的超高周和低于疲劳极限的应力水平下往往仍发生疲劳破坏, 其疲劳破坏多起源于钢中的大尺寸非金属夹杂物^[5-10].

关于高强度钢洁净度的评价, 其传统方法主要是测定钢中的杂质元素含量特别是氧含量或用金相法评定夹杂物的级别. 但是, 对于高强度钢的高周疲劳特别是超高周疲劳, 这种方法往往不可靠^[6,11]. 随着现代炼钢技术特别是炉外精炼技术的发展, 弹簧钢的洁净度和夹杂物控制水平显著提高, 这必然影响其疲劳破坏行为. 本文选择三种成分十分接近、具有基本相同洁净度水平的高强度弹簧钢 60Si2CrVA, 用超声波疲劳实验机研究其超高周疲劳性能, 并用断裂力学的方法研究其疲劳断口特征和破坏机理.

1 实验方法

实验材料为 3 种商业 60Si2CrVA 弹簧钢, 编号分别为 D-60、H-60 和 A-60(表 1), 其冶炼工艺为电弧炉熔炼 + 炉外精炼 + 真空脱气处理(EAF+LF+VD).

D-60 和 H-60 实验料为直径 18 mm 的热轧棒材, A-60 实验料为 60 mm×14 mm 的热轧板材. 将所有实验料在 850 °C 保温 1 h 退火处理后, 分别加工成标准拉伸试样、超声波疲劳试样和疲劳裂纹扩展速率用紧凑拉伸 (CT) 试样的毛坯, 再将试样毛坯热处理. 热处理制度为: 淬火加热温度分别为: 850 °C (D-60)、925 °C (H-60)、900 °C (A-60), 保温 30 min 后油淬, 然后均在 410 °C 保温 90 min 后空冷.

将热处理后的试样毛坯再精加工成标准拉伸试样 ($l_0=5d_0$, $d_0=5$ mm)、超声波疲劳试样 (杯锥状, 最小处直径 3 mm) 和紧凑拉伸 (CT) 试样 (厚度 7.5 mm)^[12]. 对精加工的超声波疲劳试样, 沿轴向对中心细径处进行机械抛光, 以去掉表面的横向加工刀痕. 在日本岛津 USF-2000 型超声波疲劳实验机上进行室温超高周疲劳实验, 试样的共振频率为 20 kHz, 载荷比 $R=-1$, 共振间歇为 150 ms. 按照 GB/T 6398-1986, 在德国申克公司的 PC160M 型共振液压疲劳实验机上进行室温疲劳裂纹扩展速率实验, 载荷为 100 kN, 频率 10 Hz, 载荷比 $R=0.1$. 用日立 S-4300 型场发射扫描电镜 (SEM) 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. 从疲劳试样上截取金相试样, 用日本 Olympus 公司的 GX51 型光学显微镜观察微观组织形貌.

2 结果与讨论

2.1 疲劳 $S-N$ 特征曲线

3 种实验料中温回火后的微观组织没有明显的差别, 均为细小的回火马氏体 (图 1), 其力学性能列于表 2, 抗拉强度均高于 1900 MPa.

从图 2 可见, 3 种实验料的疲劳断裂绝大部分起裂于内部夹杂物, 随着外加应力幅的减小其 $S-N$ 曲线均连续下降. 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, D-60 料有比较明显的疲劳极限, 而 H-60 和 A-60 料没有明显的疲劳极限. D-60、H-60 和 A-60 料的 $S-N$ 曲线依次向右上移动, 即其疲劳寿命和疲劳强度依次提高.

表 1 实验用 60Si2CrVA 弹簧钢的化学成分

Table 1 Chemical compositions of the three tested 60Si2CrVA steels (mass fraction, %)

Steel No.	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	O	N
D-60	0.58	1.58	0.51	0.010	0.002	1.02	0.17	0.0010	0.0087
H-60	0.58	1.44	0.47	0.012	0.009	0.99	0.12	0.0010	0.0077
A-60	0.56	1.57	0.65	0.012	0.010	1.10	0.14	0.0010	0.0051

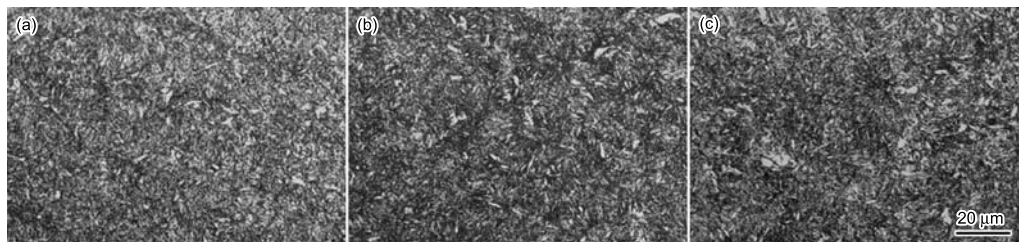


图 1 60Si2CrVA 弹簧钢回火后的金相微观组织

Fig.1 Optical microstructures of the tested 60Si2CrVA steels D-60 (a), H-60 (b) and A-60 (c), which were all tempered at 410 °C for 90 min, showing their tempering martensitic structures

表 2 60Si2CrVA 弹簧钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of the three tested 60Si2CrVA steels

Steel No.	Tensile strength, R_m /MPa	Yield strength, $R_{p0.2}$ /MPa	Elongation, A /%	Reduction of area, Z /%	Vickers hardness, HV
D-60	1945	1765	8.8	43.8	565
H-60	1955	1700	7.0	37.8	571
A-60	1925	1645	9.5	41.5	562

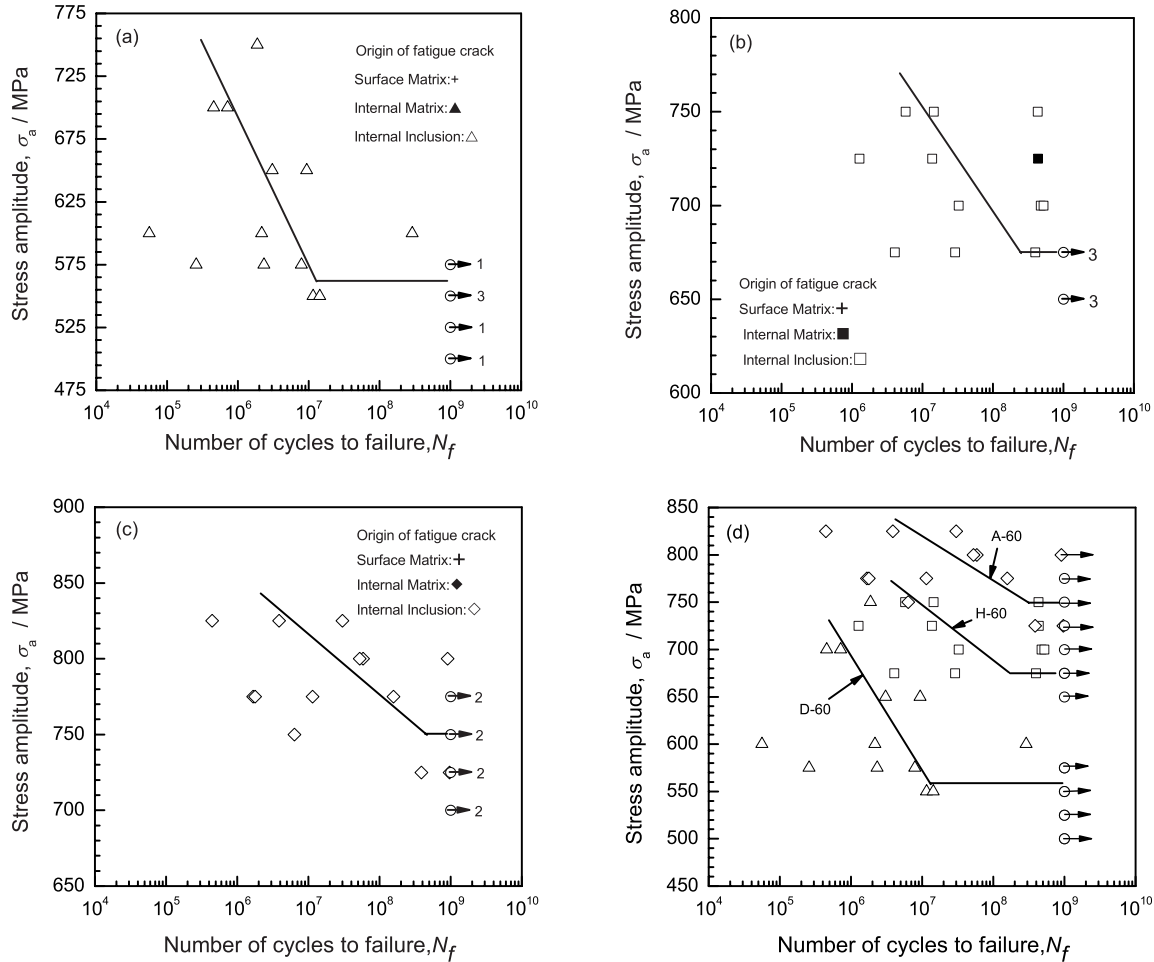
图 2 60Si2CrVA 弹簧钢的超声波疲劳 $S-N$ 曲线

Fig.2 $S-N$ curves of ultrasonic fatigue test of the tested 60Si2CrVA steels D-60 (a), H-60 (b), A-60 (c), and the combined $S-N$ curve (d) (the numerals 1, 2 and 3 indicating the numbers of unbroken specimens in 10^9 cyc region)

2.2 疲劳断口特征和力学计算

根据对 3 种实验料的超声波疲劳断口的 SEM 观察, 将裂纹源的统计结果列于表 3. 可见, 除了个别试样, 大部分试样的疲劳断裂均起裂于内部夹杂物. 图 3 表明, 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的疲劳断裂, 裂纹源夹杂物的尺寸大多小于 $30 \mu\text{m}$, 个别较粗大的大于 $40 \mu\text{m}$.

对于断裂周次较高 (通常大于 10^6 cyc) 的疲劳断口, 裂纹源区在低倍下多呈典型的“鱼眼”形状貌 (图 4a). 在“鱼眼”的心部, 多存在非金属夹杂物 (图 4b).

能谱分析表明, 这些夹杂物主要含 Al、Mg、Ca 和 O 等, 个别的含少量 Si, 为复合氧化物夹杂. 在夹杂物周围往往存在一个粒状亮区 (图 4c), 在高倍下该区域比较粗糙 (图 4d). 这类粗糙区域的存在是高周特别是超高周疲劳内部起裂断口中一个比较普遍的现象 [10,13-15], 本文称其为 GBF (granular bright facet) 区. 鲁连涛等 [16] 认为, 夹杂物周围的球状碳化物在超高周疲劳过程中从组织中脱离形成短裂纹, 短裂纹成长而连接形成 GBF 区; Murakami 等 [17] 则认为, 在材料的制备过程中氢被夹杂物捕获, 在交变应力作

表 3 超声波疲劳试样断口裂纹源的统计结果

Table 3 Summary of ultrasonic fatigue fracture initiation sites

Steel No.	Number of specimens with various fatigue fracture initiation sites (range of stress amplitude, MPa)				Inclusion size range / μm	Average inclusion size / μm
	SM	IM	II	Inclusion type		
	D-60	1(700)	1(600)			
H-60	—	1(725)	11(675~750)	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{MgO}\cdot\text{CaO}$	14.6~52.2	23.8
A-60	—	—	21(725~825)	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{MgO}\cdot\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	2.7~46.3	17.5

Note: SM- surface matrix, IM- internal matrix, II- internal inclusion

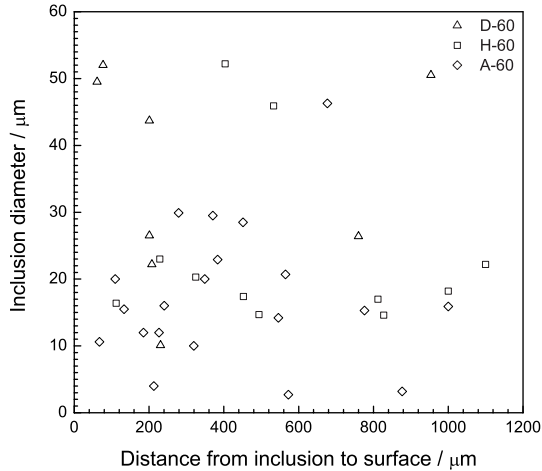


图 3 60Si2CrVA 弹簧钢超声波疲劳断口裂纹源处夹杂物的尺寸及其分布

Fig.3 Size and distribution of inclusions at the origins of ultrasonic fatigue fracture of the three tested 60Si2CrVA steels, showing most fractures were originated from inclusions smaller than $30\ \mu\text{m}$, and the others from inclusions larger than $40\ \mu\text{m}$

用下形成氢脆破坏,当裂纹扩展的第一阶段完成后氢的作用消失,断口上出现通常的平滑疲劳裂纹。

在疲劳破坏过程中,夹杂物周围的应力场强度因子是一个重要参数,与夹杂物尺寸有密切的关系。Murakami 等^[18]给出了表面夹杂物和内部夹杂物应力场强度因子幅的计算公式

$$\Delta K_{\text{inc},s} = 0.65\sigma\sqrt{\pi\sqrt{A_{\text{inc},s}}} \quad (1)$$

和

$$\Delta K_{\text{inc},i} = 0.50\sigma\sqrt{\pi\sqrt{A_{\text{inc},i}}} \quad (2)$$

其中 σ 为夹杂物所在位置的应力(MPa), $A_{\text{inc},s}$ 、 $A_{\text{inc},i}$ 分别为表面夹杂物和内部夹杂物在断裂面上的投影面积(μm^2)。由图5可见, ΔK_{inc} 与 N_f 有良好的相关性,即随 ΔK_{inc} 降低, N_f 增加。如用GBF区面积

A_{GBF} 代替内部夹杂物在断裂面上的投影面积 $A_{\text{inc},i}$,则可得到GBF区边界的应力场强度因子幅^[13]

$$\Delta K_{\text{GBF}} = 0.5\sigma\sqrt{\pi\sqrt{A_{\text{GBF}}}} \quad (3)$$

其中 σ 为GBF所在位置的应力(MPa), A_{GBF} 为GBF区在断裂面上的投影面积,包括夹杂物面积(μm^2)。图6表明,与夹杂物的不同(图5),A-60料的 ΔK_{GBF} 并不随着 N_f 的变化而变化,其范围为 $3.9\text{--}5.4\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,平均值为 $4.6\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

2.3 夹杂物尺寸对疲劳性能的影响

在图7中,A-60料疲劳裂纹扩展速率 da/dN 曲线的门槛值 ΔK_{th} 为 $4.3\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,虚线表示 ΔK_{GBF} 在 da/dN 曲线上所对应的部分。可以看出, ΔK_{GBF} 的平均值与 ΔK_{th} 十分接近。在应力作用下高强度钢中的粗大夹杂物周围易造成应力集中,夹杂物周围的区域往往受三维拉应力作用;在疲劳循环应力作用下夹杂物周围的组织弱区产生微裂纹和微孔^[19],微裂纹可在低于长裂纹的应力场强度因子门槛值 ΔK_{th} 以下扩展^[20,21]。这表明, ΔK_{GBF} 可能是在夹杂物周围形成的微裂纹进入稳态扩展区的门槛值。对于一种2000 MPa级中碳弹簧钢、SUJ2轴承钢和SNCM439高强度钢,超高周疲劳断口的断裂力学分析亦发现了同样的现象^[12,13,15]。当夹杂物的尺寸较小时,夹杂物处的 ΔK_{inc} 亦较小。如果该值小于 ΔK_{GBF} ,则在夹杂物处萌生的微裂纹在循环应力的作用下缓慢扩展,形成GBF区,当GBF区界面 ΔK_{GBF} 等于 ΔK_{th} 时,裂纹按Paris机制发生连续稳态扩展,并最终发生断裂;当夹杂物的尺寸较大时, ΔK_{inc} 大于 ΔK_{GBF} ,则疲劳裂纹直接按Paris机制发生连续稳态扩展,不形成GBF区。夹杂物尺寸越小,形成的GBF区尺寸越大,疲劳寿命越长。

Murakami 等^[17]根据大量的实验结果,提出了预测高强度钢疲劳强度的关系式

$$\sigma_{-1} \cong C(\text{HV} + 120)/(\sqrt{A_i})^{1/6} \cdot [(1 - R)/2]^\alpha \quad (4)$$

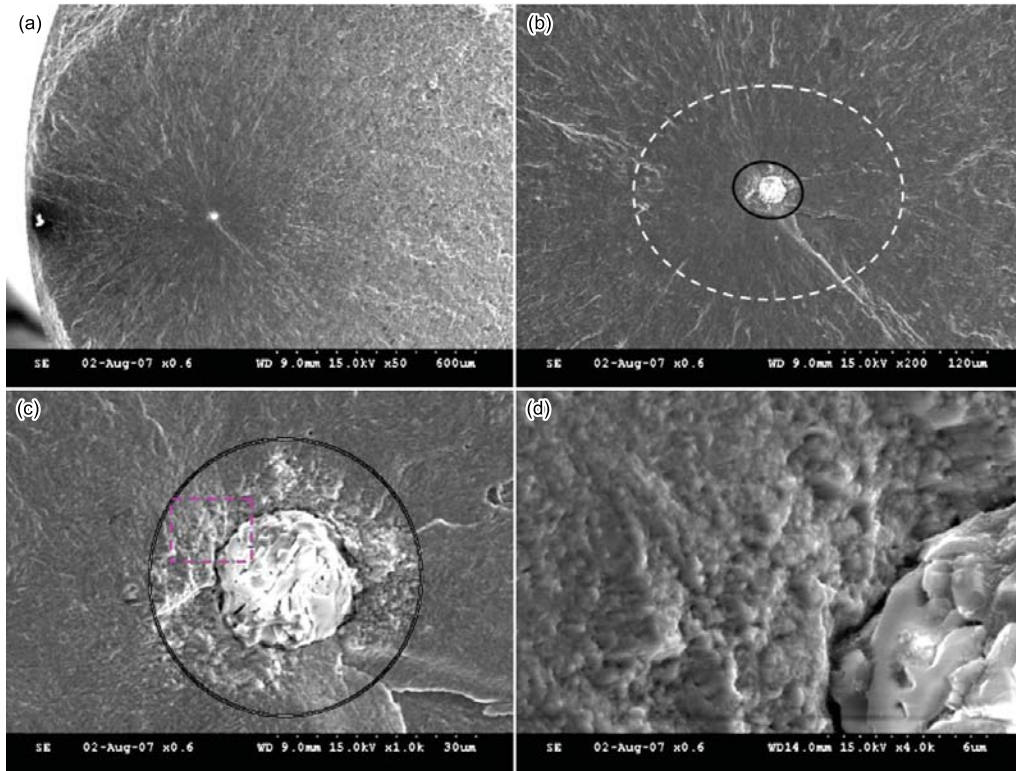


图 4 实验料的典型超声波疲劳断口裂纹源形貌

Fig.4 SEM fractographs showing a “fish-eye” (a) with an inclusion in the center (b) and a GBF surrounding the inclusion (c) and its high-reservation magnification (d) of crack initiation site of A-60 steel ($\sigma_a=725$ MPa, $N_f=3.87 \times 10^8$ cyc)

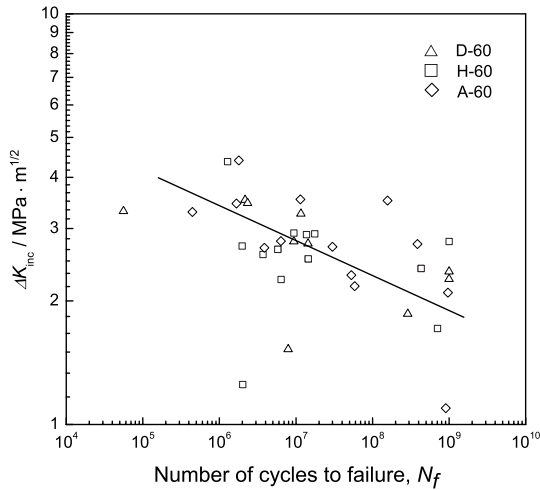


图 5 实验料疲劳断口裂纹源夹杂物处的应力场强度因子幅 ΔK_{inc} 与试样疲劳寿命 N_f 之间的关系

Fig.5 Relationship between stress intensity factor range at inclusion at the origins of fatigue fracture ΔK_{inc} and fatigue life N_f , showing an increasing tendency of N_f with decreasing ΔK_{inc} independence of the tested steels

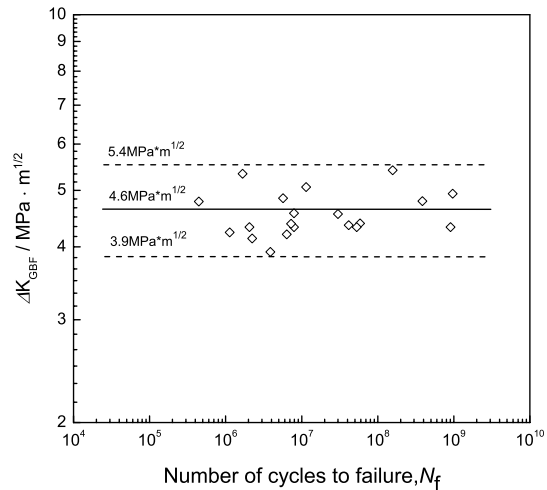


图 6 实验料 A-60 疲劳断口裂纹源 GBF 处的应力场强度因子幅 ΔK_{GBF} 与疲劳寿命 N_f 之间的关系

Fig.6 Relationship between stress intensity factor range at GBF at the origins of fatigue fracture ΔK_{GBF} and fatigue life N_f of steel A-60, showing an independence tendency of N_f with ΔK_{GBF}

其中 HV 为试样的维氏硬度, A_i 为沿最大主应力方向夹杂物的投影面积, R 为应力比, $\alpha=0.226$

$+HV \times 10^{-4}$, C 为与夹杂物等缺陷位置有关的常数。显然, 在硬度 (或强度) 不变的情况下, 减小夹杂物

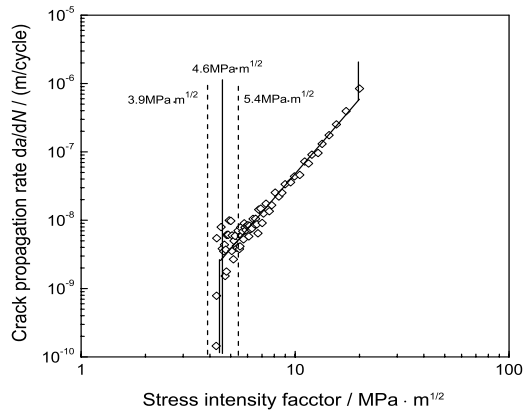


图7 A-60的疲劳裂纹扩展速率 da/dN 与应力场强度因子幅 ΔK 的关系

Fig.7 Relationship between fatigue crack propagation rate da/dN and stress intensity factor range ΔK of steel A-60

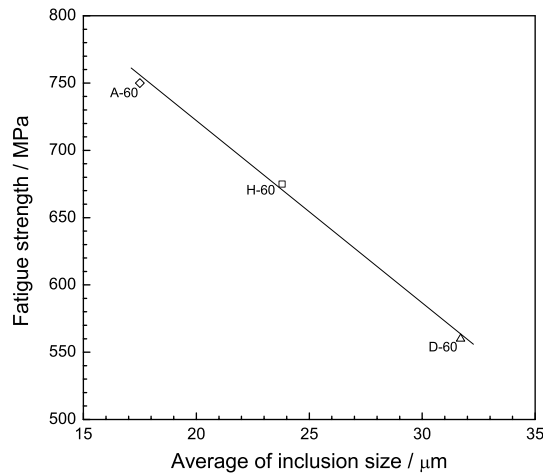


图8 疲劳强度与成为疲劳破坏起点的夹杂物平均尺寸之间的关系

Fig.8 Relationship between fatigue strength and the average size of inclusion at the origins of fatigue fracture

等内部缺陷的尺寸能够显著提高钢的疲劳强度. 尽管3种实验料的氧含量相同, 但是夹杂物控制水平特别是夹杂物的尺寸存在明显的差异, 使其疲劳性能存在明显不同. 实验料的疲劳强度与疲劳源夹杂物平均尺寸之间存在良好的相关性(图8).

3 结 论

1. 对于3种不同冶金质量的60Si2CrVA弹簧钢, 随着夹杂物尺寸的减小, 其疲劳寿命和疲劳强度均提高.

2. 无论对于高应力幅还是低应力幅, 实验弹簧钢中的疲劳裂纹绝大部分起源于粗大的氧化物夹杂.

3. 对于A-60实验料, 随着疲劳断口裂纹源夹杂物处应力场强度因子幅 ΔK_{inc} 的减小, 疲劳寿命 N_f 增加; 而GBF处的 ΔK_{GBF} 并不随 N_f 变化而变化, 基本为一常数(平均值为 $4.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), 与疲劳裂纹扩展门槛值 ($4.3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) 相当, 表明 ΔK_{GBF} 是在夹杂物周围形成的微裂纹进入稳态扩展区的门槛值.

参 考 文 献

- 1 FU Shuhong, HUI Weijun, LIU Zhonghua, DONG Han, WENG Yuqing, Fatigue fracture behaviour of a medium carbon high-strength spring steel of 2000 MPa class, J. of Iron & Steel Research, **18**(10), 30(2006)
(付书红, 惠卫军, 刘中华, 董瀚, 翁宇庆, 一种2000MPa级中碳高强度弹簧钢的疲劳破坏行为, 钢铁研究学报, **18**(10), 30(2006))
- 2 HUI Weijun, DONG Han, WENG Yuqing, Development trend of high strength steels used for automotive suspension coil springs, Journal of Iron and Steel Research, **13**(2), 67(2001)
(惠卫军, 董瀚, 翁宇庆, 汽车螺旋悬挂用钢的发展动向, 钢铁研究学报, **13**(2), 67(2001))
- 3 C.S.Lee, K.A.Lee, D.M.Li, S.J.Yoo, W.J.Nam, Microstructural influence on fatigue properties of a high-strength spring steel, Mater. Sci. Engng., **A241**, 30(1998)
- 4 YAN Guiling, WANG Hong, GAO Qing, Ultrasonic fatigue testing and its applications, Mechanics in Engineering, **26**, 25(2004)
(闫桂玲, 王弘, 高庆, 超声疲劳实验方法及其应用, 力学与实践, **26**, 25(2004))
- 5 J.M.Zhang, S.X.Li, Z.G.Yang, G.Y.Li, W.J.Hui, Y.Q.Weng, Influence of inclusion size on fatigue behavior of high strength steels in the gigacycle fatigue regime, Int. J. of Fatigue, **29**(4), 765(2007)
- 6 ZHANG Jiming, YANG Zhenguo, LI Shouxin, LI Guangyi, HUI Weijun, WENG Yuqing, Ultra high cycle fatigue behavior of automotive high strength spring steels 54SiCrV6 and 54SiCr6, Acta Metall. Sinica, **42**(3), 259(2006)
(张继明, 杨振国, 李守新, 李广义, 惠卫军, 翁宇庆, 汽车用高强度弹簧钢54SiCrV6和54SiCr6的超高周疲劳行为, 金属学报, **42**(3), 259(2006))
- 7 Z.G.Yang, G.Yao, G.Y.Li, S.X.Li, Z.M.Chu, W.J.Hui, H.Dong, Y.Q.Weng, The effect of inclusions on the fatigue behavior of fine-grained high strength 42CrMoVNb steel, Int. J. of Fatigue, **26**, 959(2004)
- 8 T.Abe, Y.Furuya, S.Matsuoka, Gigacycle fatigue properties of 1800 MPa class spring steels, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., **27**, 159(2004)
- 9 Q.Y.Wang, J.Y.Berard, A.Dubarré, G.Baudry, S.Rathery, C.Bathias, Gigacycle fatigue of ferrous alloys, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., **22**, 667(1999)
- 10 Y.Murakami, N.Yokoyama, J.Nagata, Mechanism of fatigue in ultralong life regime, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., **25**, 735(2002)

- 11 NIE Yihong, HUI Weijun, FU Wantang, WENG Yuqing, Effect of cleanliness on fatigue fracture behavior of 42CrMo steel, Chinese J. of Materials Research, **21**(suppl), 123(2007)
(聂义红, 惠卫军, 傅万堂, 翁宇庆, 洁净度对 42CrMo 钢疲劳破坏行为的影响, 材料研究学报, **21**(增刊), 123(2007))
- 12 NIE Yihong, HUI Weijun, FU Wantang, WENG Yuqing, DONG Han, Ultra high cycle fatigue behavior of medium-carbon high strength spring steel NBS1, Acta Metall. Sinica, **43**(10), 1031(2007)
(聂义宏, 惠卫军, 傅万堂, 翁宇庆, 董瀚, 一种中碳高强度弹簧钢超高周疲劳破坏行为的研究, 金属学报, **43**(10), 1031(2007))
- 13 T.Sakai, Y.Sato, N.Oguma, Characteristic S-N properties of high-carbon-chromium-bearing steel under axial loading in long-life fatigue, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., **25**, 765(2002)
- 14 K.Tanaka, Y.Akimiwa, Fatigue crack propagation behaviour derived from S-N data in very high cycle regime, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., **25**, 775(2002)
- 15 Y.Ochi, T.Matsumura, K.Masaki, S.Yoshida. High-cycle rotating bending fatigue property in very long-life regime of high-strength steels, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., **25**, 823(2002)
- 16 LU Liantao, K.Shinozawa, Y.Morii, S.Nishino, Fatigue fracture process of a high-carbon-chromium bearing steel in ultra-long life regime, Acta Metall. Sinica, **41**(10), 1066(2005)
(鲁连涛, 盐泽和章, 森井佑一, 西野精一, 高碳铬轴承钢超长寿命疲劳破坏过程的研究, 金属学报, **41**(10), 1066(2005))
- 17 Y.Murakami, T.Nomoto, T.Ueda, Factors influencing the mechanism of superlong fatigue failure in steels, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., **22**, 581(1999)
- 18 Y.Murakami, S.Kodama, S.Konuma, Quantitative evaluation of effects of non-metallic inclusions on fatigue strength of high strength steels (I), Int. J. Fatigue, **11**(5), 291(1989)
- 19 WANG Xishu, LIANG Feng, ZENG Yanping, XIE Xishan, SEM in situ observations to the effects of inclusions on initiation and propagation of the low cycle fatigue crack in super strength steel, Acta Metall. Sinica, **41**(12), 1272(2005)
(王习术, 梁锋, 曾燕屏, 谢锡善, 夹杂物对超高强度钢低周疲劳裂纹萌生及扩展影响的原位观察, 金属学报, **41**(12), 1272(2005))
- 20 K.Tanaka, Y.Nakai, M.Yamashita, Fatigue growth threshold of small cracks, Int. J. of Fracture, **17**(5), 519(1981)
- 21 HONG Youshi, FANG Biao, Theory and meso-scopic process of initiation and propagation of short fatigue crack, Advance in Mechanics, **23**(4), 468(1993)
(洪友士, 方彪, 疲劳短裂纹萌生及发展的细观过程和理论, 力学进展, **23**(4), 468(1993))