

## 不同循环载荷下 54SiCr6 钢的疲劳强度\*

陈树铭 李永德 柳洋波 杨振国 李守新 张哲峰

(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)

**摘要** 对高强弹簧钢 54SiCr6 在 3 种循环加载条件下(旋转弯曲, 超声和拉压)的疲劳性能进行了测试和比较. 由于疲劳试样存在应力梯度和尺寸差异, 3 种循环载荷下对应的疲劳强度有较大差别. 断口分析表明, 3 种疲劳样品也具有不同的断口形貌. 通过计算高应力截面积, 可以得到不同载荷下疲劳强度之间的定量关系, 从而为评估不同载荷下的不同试样的高强钢疲劳强度提供依据.

**关键词** 高强弹簧钢, 循环加载, 疲劳强度, 高应力截面积

中图分类号 TG 142

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2009)04-0428-06

## FATIGUE STRENGTHS OF THE 54SiCr6 STEEL UNDER DIFFERENT CYCLIC LOADING CONDITIONS

CHEN Shuming, LI Yongde, LIU Yangbo, YANG Zhenguo, LI Shouxin, ZHANG Zhefeng  
Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences,  
Shenyang 110016

Correspondent: CHEN Shuming, Tel: (024)83978023, E-mail: smchen@imr.ac.cn

Supported by National Basic Research Program of China (No.G2004CB619100)

Manuscript received 2008-09-19, in revised form 2008-12-22

**ABSTRACT** Since ultrasonic fatigue test has been used to study the very high cycle fatigue ( $10^7$ — $10^9$  cyc), the difference between ultrasonic and conventional fatigue test methods should be evaluated in order to ensure the validity of ultrasonic fatigue result. By comparing some results of other researchers, it is found that the frequency effect is negligible, and the loading condition is the main reason for the difference. A comparison of the fatigue strengths of the 54SiCr6 high strength spring steel under three kinds of cyclic loading conditions, rotating bending (RB), tension compression (TC) and ultrasonic (UL), was reported. The results reveal that the three kinds of fatigue specimens display different fracture features, and the fatigue strength of RB is the highest, TC is the lowest, and UL is somewhere in between. The difference in the fatigue strengths is mainly attributed to the distinctions of stress gradient and the size of specimens. By taking highly stressed cross-section area (HSCA) into consideration, a relationship of the fatigue strength and loading condition was proposed, and the two constants  $\sigma_{lim,0}$  and  $\alpha_{\varepsilon A}$  in the equation of HSCA are mainly dependent on material strength and inclusion size, respectively. A relationship of fatigue strengths between RB and TC is also discussed specifically.

**KEY WORDS** high strength spring steel, cyclic loading, fatigue strength, highly stressed cross-section area (HSCA)

对高强钢的常规高周疲劳(约  $10^7$  cyc)已经进行了大量实验研究,主要采用的方法是旋转弯曲实验(rotating bending, 简称 RB)以及常规拉压实验(tension compression, 简称 TC).近年来,鉴于高强钢使用条件的提高,需要对其超高周疲劳( $10^7$ — $10^9$  cyc)进行实验研究,主要采用的方法是超声疲劳实验方法(ultrasonic, 简称

UL),因其工作频率较高(15—30 kHz),能大大节省了疲劳实验时间和费用<sup>[1-7]</sup>,因而日益引起重视.

超声与常规 TC 疲劳的主要区别是频率和加载方式的差别. Furuya 等<sup>[8]</sup>, Marines 等<sup>[9]</sup>和 Wang 等<sup>[10]</sup>通过常规疲劳(10—100 Hz)和超声疲劳(20 kHz)的数据分析,认为频率的变化对材料的疲劳性能影响不大. Ebara<sup>[1]</sup>认为应力水平较低(疲劳极限附近)时,频率的影响很小.而对于 RB,除了上述频率差别外,还有应力分布的不同<sup>[11]</sup>.研究超声和常规疲劳的差别,能够有助于人们对这些疲劳实验方法有更深入的了解,使超声疲劳实

\* 国家重点基础研究发展计划资助项目 G2004CB619100

收到初稿日期: 2008-09-19, 收到修改稿日期: 2008-12-22

作者简介: 陈树铭,男,1983年生,硕士生

验得到进一步的发展与应用。

本文选择了典型的商用弹簧钢 54SiCr6, 采用相同的热处理和加工工艺, 设计出 3 种适合不同疲劳试验机的样品进行实验. 疲劳实验后, 首先对裂纹源位置进行分析, 采用扫描电镜进行断口观察. 其次, 比较不同实验条件下的 S-N 曲线和疲劳强度的差别. 最后, 利用载荷形式所对应的应力梯度关系, 结合其他文献数据, 对不同加载条件下疲劳强度的差别给出了定量估计.

### 1 实验步骤

本实验采用的是直径为 15 mm 的热轧 54SiCr6 棒材, 其化学成分 (质量分数, %) 为: C 0.57, Si 1.52, Cr 0.71, Mn 0.68, S≤0.01, P≤0.01, Al≤0.015, Fe 余量. 所有样品先加工成拉伸试样和 3 种疲劳样品的毛坯, 再采用相同的热处理工艺: 870 °C 保温 30 min 奥氏体化后油淬; 430 °C 保温 45 min 回火. 实验样品的外形与尺寸如图 1 所示, 为了使样品的断裂位置居中, 实验样品都采用沙漏形设计. 为了减少表面缺陷对疲劳性能的影响, 依次采用 400, 600, 800, 1200 和 2000 号砂纸对 3 种样品的表面进行研磨. RB, TC 和 UL 试样分别在国产 PQ1-6 纯弯曲疲劳试验机, 国产 PLG-100C 电磁谐振疲劳试验机和岛津 USF-2000 超声疲劳试验机上进行测试. 其循环加载频率分别为 89 Hz, 110 Hz 和 20 kHz, 其中 UL 实验的共振间隙时间为 150 ms. 为了便于比较, 载荷比  $R$  均为  $-1$ . 由于实验时间的限制, RB 和 TC 实验测定  $10^7$  cyc 时疲劳强度, 而 UL 实验测定  $10^7$  与  $10^9$  cyc 时疲劳强度. 疲劳强度采用升降法测定. 用 LEO-SUPRA-35 扫描电镜 (SEM) 分析疲劳断口形貌, 借助能谱 (EDS) 确定裂纹源处夹杂物种类.

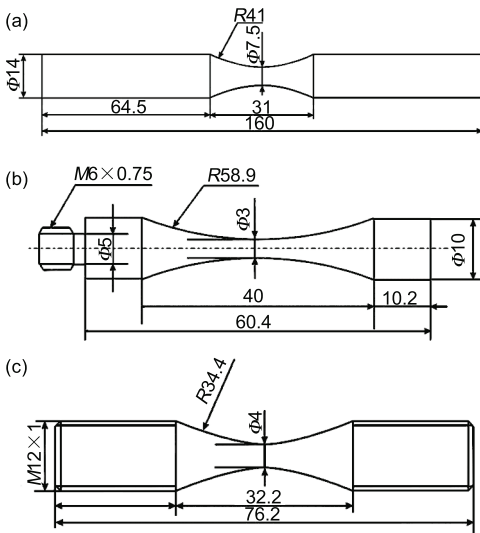


图 1 实验用疲劳试样的尺寸

Fig.1 Dimensions of the samples used in fatigue tests of rotating bending (RB) (a), ultrasonic (UL) (b) and tension compression (TC) (c)

## 2 实验结果

### 2.1 拉伸与疲劳性能

经热处理后, 拉伸实验在 Instron 8801 实验机上进行, 应变速率为  $10^{-3} s^{-1}$ , 其力学性能 (包括: 屈服强度  $\sigma_s$ , 抗拉强度  $\sigma_b$ , 延伸率  $\delta$ , 维氏硬度 HV 以及疲劳强度  $\sigma_{-1}$ ) 如表 1 所示. 3 种实验样品的 S-N (疲劳应力 ( $\sigma_a$ ) — 疲劳寿命 ( $N_f$ )) 曲线如图 2 所示. 从图可见, RB 和

表 1 54SiCr6 弹簧钢的力学性能

Table 1 Mechanical properties of commercial 54SiCr6 spring steel

$\sigma_s$ MPa	$\sigma_b$ MPa	$\delta$ %	HV GPa	$\sigma_{-1}$ , MPa		
				RB	UL	TC
1628	1882	10.6	5.26	843	741 <sup>1)</sup> , 766	663

Note: 1) 741 is the fatigue strength for  $10^9$ cyc and the others for  $10^7$ cyc

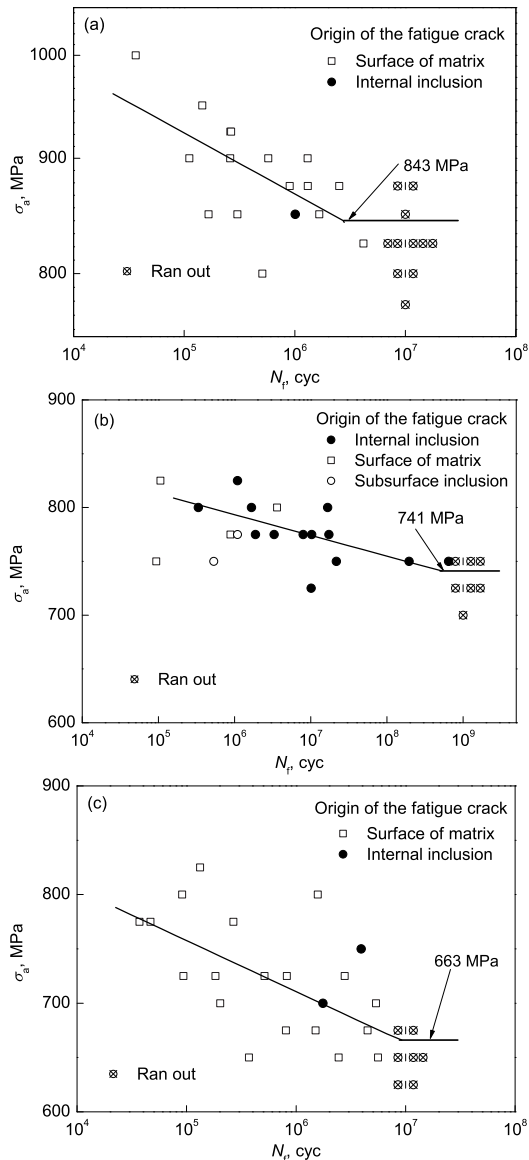


图 2 3 种实验样品的 S-N 曲线图

Fig.2 S-N curves of the fatigue specimens tested in RB (a), UL (b) and TC (c)

TC 的数据分散性比较大, 并且与 UL 不同的是, 它们的疲劳裂纹萌生位置主要在表面, 而 UL 则在  $10^7$  cyc 内就有较多的内部夹杂物起裂. 在疲劳强度的对比上, 可以看到 RB 最高, 而 UL 次之, 最低是 TC. 对应的疲劳强度数据亦列于表 1, 这些结果都表明实验加载方式的不同对 S-N 曲线及疲劳强度有较大影响.

## 2.2 断口分析

通过对 3 种样品的断口观察, 如图 3—5 所示, 可以看到各自具有一定特殊的形貌. 其中 UL 和 TC 试样的断口形貌比较相近, 可以看到裂纹源附近都经历早期平坦的扩展区, 然后进入加速扩展区, 最后进入拉伸瞬断区,

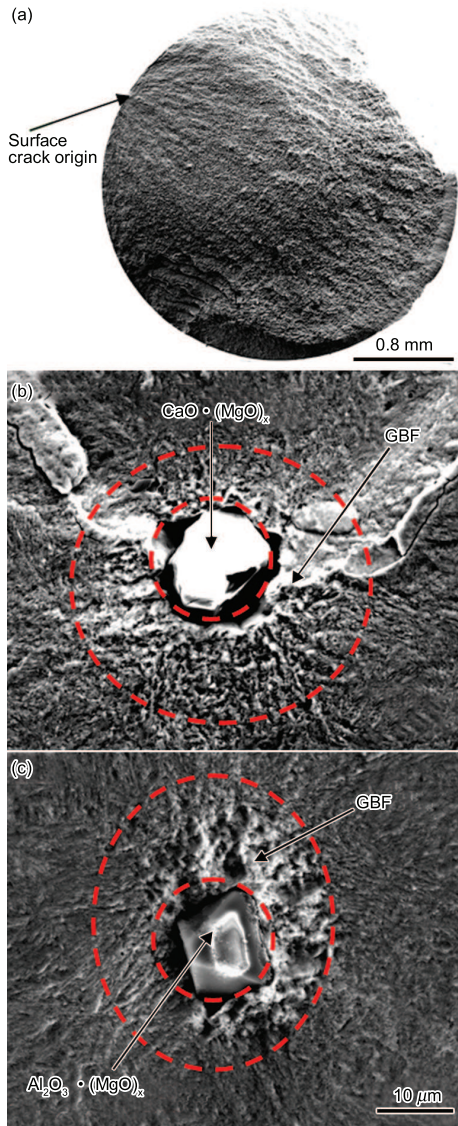


图 3 UL 试样的断口 SEM 照片

**Fig.3** Fractographs of the specimens in UL fatigue test  
(a) macro graph, 775 MPa,  $8.825 \times 10^5$  cyc, crack initiated at the surface of specimen  
(b) crack initiated at internal  $\text{CaO} \cdot (\text{MgO})_x$  inclusion, 775 MPa,  $1.027 \times 10^7$  cyc  
(c) crack initiated at internal  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{MgO})_x$  inclusion, 750 MPa,  $6.469 \times 10^8$  cyc

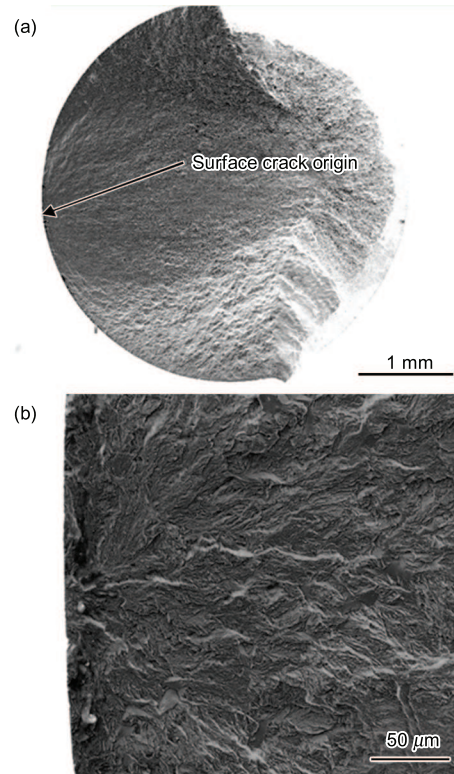


图 4 TC 试样的断口 SEM 照片

**Fig.4** Macro (a) and micro (b) fractographs of the specimen in TC fatigue test under 675 MPa and  $4.5 \times 10^6$  cyc, crack initiated at the surface of specimen

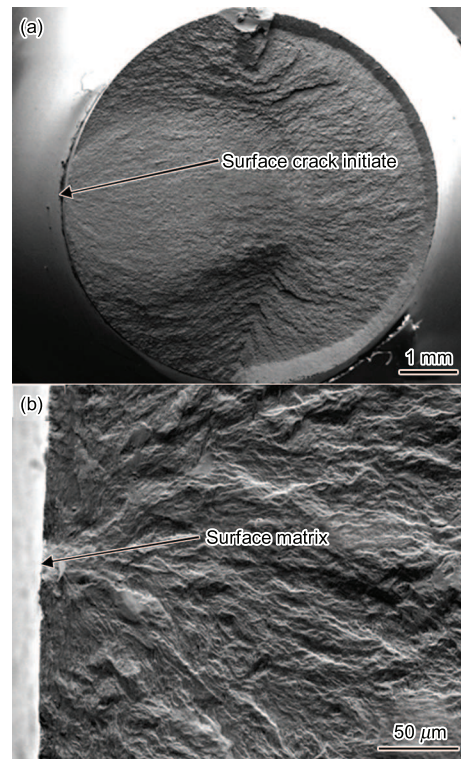


图 5 RB 试样的疲劳断口 SEM 照片

**Fig.5** Macro (a) and micro (b) fractographs of the specimen in RB fatigue test under 825 MPa and  $4.2 \times 10^6$  cyc, crack initiated at the surface of specimen

断口较为平整. RB 试样与 UL, TC 试样断口的区别主要是裂纹源和瞬断区的分布: 如果从裂纹源和试样中心画一条直线, UL 和 TC 试样断口直线两边的形貌基本一致, 而 RB 试样的瞬断区偏于一侧. 另外, RB 的断口较 UL 和 TC 的断口粗糙.

从起裂位置考虑, UL 试样的起裂位置主要在夹杂物, 且和试样的疲劳寿命长短有关. 总体来看, 对应于高应力的低周区 ( $10^7$  cyc 以下), 以表面缺陷为裂纹源 (图 3a), 由表面加工刀痕和亚表面夹杂物引起开裂; 而对应于低应力的低周区 ( $10^7$  cyc 以上) 是以夹杂物为主 (图 3b, 3c), 同时出现通常所称的 GBF 区 (granular bright facet, 简称 GBF)<sup>[12]</sup>, 或者 ODA 区 (optically dark area, 简称 ODA)<sup>[13]</sup>, 与超高周疲劳的特征相吻合. 通过 EDS 分析可知, 夹杂物的种类为  $Al_2O_3$ , MgO 和 CaO, 或是它们的复合夹杂, 有时也有 TiN; 最大夹杂为  $31 \mu\text{m}$ , 最小为  $12 \mu\text{m}$ , 平均夹杂尺寸为  $16.7 \mu\text{m}$ .

对于 TC 和 RB 实验, 由于低周区 ( $10^7$  cyc 以下) 的疲劳强度更加依赖于表面加工质量, 所以绝大多数还是表面起裂 (图 4—5). 另外, RB 试样的应力分布是外层大, 心部小, 这使表面更容易成为疲劳裂纹源, 具体情况将会在讨论部分进行分析. RB 试样表面疲劳源沿表面向两侧的扩展速度较快, 其中与旋转方向相反的一侧, 裂纹扩展更快, 导致了疲劳弧线产生偏转. 这是由于疲劳源按转动方向向前旋转时, 疲劳源前面的部分转到应力较小的位置, 容易受到闭合影响, 而疲劳源后面的邻近点接近最大应力的位置时, 受裂纹闭合影响较小, 裂纹在此继续扩展, 这样必然造成向前旋转的裂纹源向后扩展更快, 从而产生了疲劳裂纹源和最后瞬断区的不对称分布 (图 5a), 这是 RB 试样断口的一个特征. 此外, 由于裂纹沿表面扩展快, 扩展后期的弧线向疲劳源方向凸起, 与疲劳源附近的弧线凸起方向相反, 这是 RB 试样断口的第二个特征<sup>[14]</sup>.

### 3 讨论

表 1 和图 2 表明, 三种载荷下的疲劳强度存在比较大的差别. UL 和 TC 试样所承受的都是对称拉压载荷, 在横截面上没有应力梯度分布, 都是单向应力; 所不同的只是频率和截面积的不同. 相关研究<sup>[1,8-10]</sup>表明, 频率效应的影响可以忽略. 由于试验机条件的限制, 所测样品的截面积不同, 可认为 TC 和 UL 的疲劳强度差别是由于截面积的不同造成的 (尺寸效应). 而 RB 在实验过程中除了尺寸效应, 还存在着应力梯度的影响, 如图 6 所示. 这是 RB 疲劳强度远大于 TC 和 UL 疲劳强度的主要原因, 也是其从表面起裂的重要原因.

随着样品体积的增加, 样品中出现微裂纹, 缺陷, 非金属夹杂以及孔隙等的几率增加, 从而增加了疲劳断裂的几率, 导致疲劳强度下降. 关于尺寸效应的研究<sup>[15-19]</sup>已有很多, 其中 Carpinteri 等<sup>[19]</sup>采用的方法是 Weibull

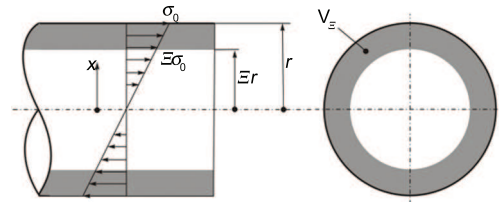


图 6 RB 试样应力分布和高应力体积示意图<sup>[11]</sup>

Fig.6 Stress distribution and schematic of highly stressed volume for cylindrical specimen in RB fatigue test

统计概念和数学分形方法. 本文用高应力体积的概念<sup>[20]</sup>, 分析由应力梯度和体积变化共同产生的对疲劳性能的影响. 对旋转弯曲试样, 应力  $\sigma$  的分布 (图 6) 函数为

$$\sigma = \frac{x}{r} \sigma_0 \quad (1)$$

式中,  $x$  为距试样轴线的距离,  $r$  为试样半径,  $\sigma_0$  为最大的表面名义应力. 对于旋转弯曲, 采用 Kuguel<sup>[20]</sup> 的高应力体积概念, 定义高应力体积  $V_E$  为试样加载时高于  $E$  倍最大应力部分的体积, 通常取  $E$  为 0.90 或 0.95, 体积为  $V_{0.90}$  或  $V_{0.95}$ , 认为只有  $V_E$  部分才会对疲劳强度产生影响, 对应的  $V_E$  越大, 则疲劳强度越低. 对应的疲劳强度计算公式为

$$\frac{\sigma_{\text{lim}, \chi_1}}{\sigma_{\text{lim}, \chi_2}} = \left( \frac{V_{E1}}{V_{E2}} \right)^{\alpha_{EV}} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_{\text{lim}, \chi_1}$  和  $\sigma_{\text{lim}, \chi_2}$  为同种材料两种应力梯度下的样品疲劳强度 ( $\chi_1, \chi_2$  分别代表两种样品的应力梯度水平),  $\alpha_{EV}$  为由材料性能所决定的常数. Sonsino<sup>[21,22]</sup> 指出: 存在一个临界体积 (范围大概在  $30-60 \text{ mm}^3$ ), 超过这个体积疲劳强度将不再下降. 对于本实验, 由于采用了沙漏形设计, 疲劳断裂局限在一个最小的截面附近, 没有超过临界体积. 为了简便, 采用截面积代替体积的方法, 可以得到下式:

$$\frac{\sigma_{\text{lim}, \chi_1}}{\sigma_{\text{lim}, \chi_2}} = \left( \frac{A_{E1}}{A_{E2}} \right)^{\alpha_{EA}} \quad (3)$$

式中,  $\alpha_{EA}$  为由材料性能所决定的常数,  $A$  为截面积. 如果取  $A_{E2}=1$ , 对应的  $\sigma_{\text{lim}, \chi_2} = \sigma_{\text{lim}, 0}$ , 则上式改写为

$$\sigma_{\text{lim}, \chi} = \sigma_{\text{lim}, 0} A_E^{\alpha_{EA}} \quad (4a)$$

取对数后得:

$$\lg \sigma_{\text{lim}, \chi} = \lg \sigma_{\text{lim}, 0} + \alpha_{EA} \lg A_E \quad (4b)$$

对于 RB, 如果考虑应力高于最大应力  $\sigma_0$  的  $E$  倍, 同时考虑应力梯度, 即应力与半径的线性关系 (式 (1)), 有:

$$A_E = \pi r^2 (1 - E^2) \quad (5)$$

本文取  $E=0.95$ , 将试样半径  $r=3.75 \text{ mm}$  代入, 对应的  $A_E = 1.37\pi \text{ mm}^2$ . 对于 TC 和 UL 试样, 因为试样截面上没有应力梯度, 所有截面都为最大的名义应力, 因此式

(5) 可改写为

$$A_{\Xi} = \pi r^2 \tag{6}$$

代入 TC 和 UL 试样的半径分别为 2 和 1.5 mm, 得到  $A_{\Xi}$  分别为  $4\pi \text{ mm}^2$  和  $2.25\pi \text{ mm}^2$ .

图 7 是  $\sigma_{-1}$  与  $A_{\Xi}$  的关系图. 对数据进行拟合得到  $\lg\sigma_{\text{lim},0} = 3.07$ ,  $\alpha_{\Xi A} = -0.23$ , 这两项是与材料对应的常数. 图 7 还示出了文献 [23] 和 [24] 中 3 种 60Si2CrVA 钢试样的  $\sigma_{-1}$  与  $A_{\Xi}$  的关系, 此 3 种试样的热处理制度及力学性能见表 2. 拟合后对应的 D60, H60, A60 3 种试样的  $\lg\sigma_{\text{lim},0}$  值分别为 2.96, 3.01, 3.05,  $\alpha_{\Xi A}$  值分别为  $-0.22$ ,  $-0.21$ ,  $-0.19$ , 这些都与本实验 54SiCr6 钢的数据比较接近.

$\sigma_{\text{lim},0}$  是对应于  $A_{\Xi}=1\pi \text{ mm}^2$  时  $10^7 \text{ cyc}$  的疲劳强度, 可以认为材料的截面积非常小, 内部微观缺陷 (如, 夹杂物, 微裂纹, 孔隙等) 的作用比较小, 因此  $\sigma_{\text{lim},0}$  仅仅是在周次一定的情况下, 由材料成分和强度所对应的常数. 通过比较 D60, H60, A60 抗拉强度与  $\sigma_{\text{lim},0}$  的关系 (图 8), 可以看到随着抗拉强度的提高,  $\sigma_{\text{lim},0}$  也逐渐提高.  $\alpha_{\Xi A}$  代表样品疲劳强度随着截面积的增大而不断减小的能力, 其与内部微观缺陷有关. 图 9 比较了  $\alpha_{\Xi A}$  与平均夹杂物尺寸的关系, 可以看到, 随着夹杂物尺寸的增加,  $-\alpha_{\Xi A}$  值不断增加, 材料的  $\sigma_{-1}$  下降.

如果采用相同直径的 RB 和 TC 试样, 则由式 (3),

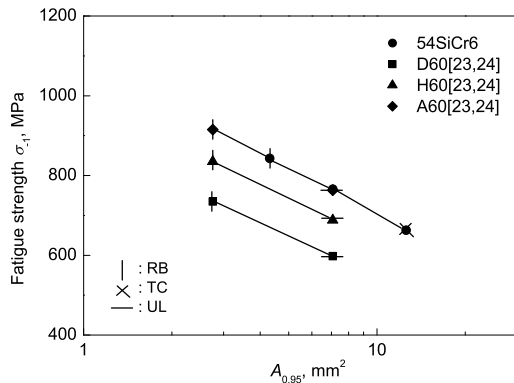


图 7 疲劳强度与高应力截面  $A_{0.95}$  的关系曲线

Fig.7 Dependences of the fatigue strength on the highly stressed cross-section area  $A_{0.95}$  for the four steels

(5) 和 (6) 得到:

$$\frac{\sigma_{\text{lim,RB}}}{\sigma_{\text{lim,TC}}} = (1 - \Xi^2)^{\alpha_{\Xi A}} \tag{7}$$

式 (7) 表明, RB 和 TC 疲劳强度的比主要取决于  $\Xi$  与  $\alpha_{\Xi A}$  值, 由于上述实验结果得出  $\alpha_{\Xi A}$  比较相近, 对于高强钢近似取  $\alpha_{\Xi A}$  值为  $-0.2$ . 如果取  $\Xi$  值为 0.95, 对应的疲劳强度比值为 1.59, 如果  $\Xi$  值为 0.90, 则对应的疲劳强度比值为 1.39, 因此  $\Xi$  值的选取对疲劳强度有重要的影响. 考虑高应力体积 (截面积) 的概念, 认为  $\Xi$  值受夹杂物尺寸与材料强度的影响较大. 如果夹杂物尺寸较

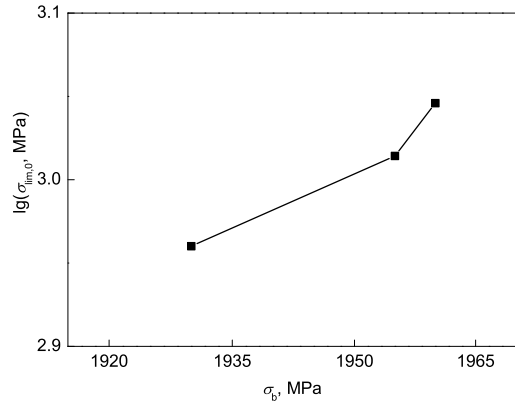


图 8 常数  $\lg\sigma_{\text{lim},0}$  与抗拉强度  $\sigma_b$  的关系

Fig.8 Relationship between parameter  $\lg\sigma_{\text{lim},0}$  and tension strength  $\sigma_b$

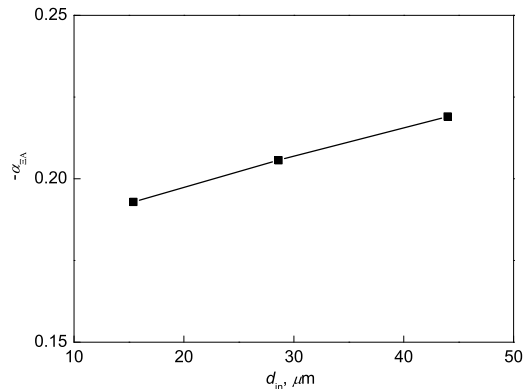


图 9 参数  $-\alpha_{\Xi A}$  与平均夹杂物尺寸的关系 [23]

Fig.9 Relationship between parameter  $-\alpha_{\Xi A}$  and average inclusion size, the average inclusion sizes of D60, H60, A60 are 44, 28.6 and 15.4  $\mu\text{m}$ , respectively [23]

表 2 60Si2CrVA 高强钢的热处理制度及对应的力学性能

Table 2 Heat treatment procedure and the corresponding mechanical properties of 60Si2CrVA high strength steel [23,24]

Specimen	Heat treatment procedure	$\sigma_b$ , MPa	$\sigma_{-1}$ , MPa	
			RB	UL
D60	850 °C/30 min+O.Q.+410 °C/90 min+A.C.	1930	735	598
H60	925 °C/30 min+O.Q.+410 °C/90 min+A.C.	1955	835	688
A60	900 °C/30 min+O.Q.+410 °C/90 min+A.C.	1960	915	763

大, 并且强度较高, 则材料对夹杂物敏感程度较高, 此时 RB 试样中更深层的夹杂物也将有可能成为疲劳裂纹源, 可以将  $\Xi$  取为 0.90. 而对于夹杂物小并且强度较低的材料, RB 的危险截面积将大大减少, 从而可取  $\Xi$  为 0.95. 如图 10 所示, 文献 [8] 和 [25] 所用的材料为 SNCM439 弹簧钢, 采用相似的热处理工艺, 得到的力学性能相当, RB 与 UL 试样的直径都为 3 mm, 最后得到  $10^7$  cyc 的疲劳强度之比为 1.36. 因为 SNCM439 的抗拉强度为 1955 MPa, 并且夹杂物的尺寸范围 9—82  $\mu\text{m}$ , 所以取  $\Xi$  值为 0.90, 由式 (7) 对应的疲劳强度比为 1.39, 与实验值比较吻合.

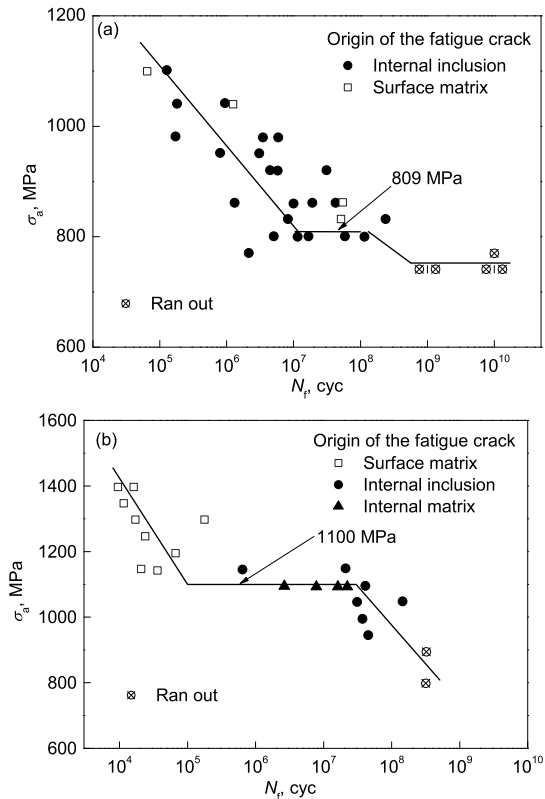


图 10 SNCM439 的实验 S-N 曲线图 [8,25]

Fig.10 S-N curves of the spring steel SNCM439 under TC (a) and RB (b) experiments [8,25]

### 3 结论

同一种高强钢采用相同的热处理制度时, 在旋转弯曲、拉压和超声 3 种实验条件下测定的  $10^7$  cyc 疲劳强度有较大的差别. 利用尺寸效应与高应力体积概念, 通过面积代替体积, 得出的疲劳强度关系表达式对实验数据拟合较好, 表明上述概念对 3 种实验获得的疲劳强度的差别作了合理的解释, 同时, 也有助于更好、更全面地评估高强钢的疲劳强度.

感谢中国科学院金属研究所李广义老师的指导与帮助.

### 参考文献

- [1] Ebara R. *Int J Fatigue*, 2006; 28: 1465
- [2] Yang Z G, Li S X, Zhang J M, Li G Y, Li Z B, Hui W J, Weng Y Q. *Acta Mater*, 2004; 52: 5235
- [3] Liu Y B, Yang Z G, Li Y D, Chen S M, Li S X, Hui W J, Weng Y Q. *Mater Sci Eng*, 2008; A497: 408
- [4] Lu L T, Zhang W H. *J Mech Strength*, 2005; 27: 388 (鲁连涛, 张卫华. 机械强度, 2005; 27: 388)
- [5] Lu L T, Shiozawa K, Morii Y, Nishino S. *Acta Metall Sin*, 2005; 41: 1066 (鲁连涛, 盐泽和章, 森井佑一, 西野精一. 金属学报, 2005; 41: 1066)
- [6] Wang Q Y, Bathias C, Kawagoishi N, Chen Q. *Int J Fatigue*, 2002; 24: 1269
- [7] Wang Q Y. *J Mater Sci*, 2004; 39: 365
- [8] Furuya Y, Matsuoka S, Abe T, Yamaguchi K. *Scr Mater*, 2002; 46: 157
- [9] Marines I, Dominguez G, Baudry G, Vittori J F, Rathery S, Doucet J P, Bathias C. *Int J Fatigue*, 2003; 25: 1037
- [10] Wang Q Y, Berard J Y, Dubarre A, Baudry G, Rathery S, Bathias C. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 1999; 22: 667
- [11] Gaenser H P. *Comput Mater Sci*. 2008; 44: 230
- [12] Shiozawa K, Morii Y, Nishino S, Lu L. *Int J Fatigue*, 2006; 28: 1521
- [13] Murakami Y, Matsunaga H. *Int J Fatigue*, 2006; 28: 1509
- [14] Lin J Z, Liu S H, Song Z L, Guo L Y, Zou D Q. *Metal Defects, Loading and Fatigue*. Beijing: China Railway Press, 1993: 69 (林吉忠, 刘淑华, 宋子谦, 郭灵彦, 邹定强. 金属的缺陷、载荷与疲劳. 北京: 中国铁道出版社, 1993: 69)
- [15] Bazant Z P. *J Eng Mech ASCE*, 1984; 110: 518
- [16] Carpinteri A. *Int J Solids Struct*, 1989; 25: 407
- [17] Findley W. *J Mech Eng Sci*, 1972; 14: 424
- [18] Frost N, Marsh K, Pook L. *Metal Fatigue*. Oxford-New York: Dover Publications, 1999: 2
- [19] Carpinteri A, Spagnoli A, Vantadori S. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 2002; 25: 619
- [20] Kuguel R. *Proc ASTM*, 1961; 61: 732
- [21] Sonsino C. *Konstruktion*, 1993; 45: 25
- [22] Sonsino C, Fischer G. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2005; 36: 632
- [23] Zhao H M, Hui W J, Nie Y H, Dong H, Weng Y Q. *Iron*, 2008; 43(5): 66 (赵海民, 惠卫军, 聂义宏, 董瀚, 翁宇庆. 钢铁, 2008; 43(5): 66)
- [24] Hui W J, Zhao H M, Nie Y H, Weng Y Q, Dong H. In: Hong J B ed. *Proceedings of CSM2007 Annual Meeting*, Beijing: The Chinese Society for Metals. 2007: 4 (惠卫军, 赵海民, 聂义宏, 翁宇庆, 董瀚. 洪及鄯主编. 2007 中国钢铁年会论文集, 北京: 中国金属学会. 2007: 4)
- [25] Ochi Y, Matsumura T, Masaki K, Yoshida S. *Fatigue Fract Eng Mater*, 2002; 25: 823