

铁素体—珠光体型非调质钢的高周疲劳破坏行为*

查小琴¹ 惠卫军² 雍岐龙²

1. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所 洛阳 471039
2. 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

摘要 研究了三种碳和钒含量不同的铁素体—珠光型非调质钢的高周疲劳破坏行为,并与调质钢进行了对比.结果表明,铁素体—珠光体型非调质钢的高周疲劳性能与其微观组织特征有关.提高铁素体相硬度,其疲劳极限及疲劳极限比均提高,疲劳极限比最高可达 0.60,远高于调质钢的 0.50;热轧态粗大的网状铁素体—珠光体组织的疲劳性能较差,低于同等强度水平的高温回火马氏体组织.铁素体—珠光体型非调质钢疲劳破坏机制不同于调质钢,其疲劳裂纹基本上萌生于试样表面的铁素体/珠光体边界,并优先沿着铁素体/珠光体边界扩展;对于同等强度水平的调质钢,不存在像铁素体那样的软相,因而易在试样表层粗大的夹杂物处萌生疲劳裂纹.

关键词 材料科学基础学科,铁素体—珠光体型非调质钢,高周疲劳,疲劳裂纹萌生和扩展,微观组织

分类号 TG142, TG111

文章编号 1005-3093(2008)06-0634-05

High-cycle fatigue fracture behavior of ferrite-pearlite type microalloyed steels

ZHA Xiaoqin¹ HUI Weijun^{2**} YONG Qilong²

1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039

2. National Engineering Research Center of Advanced Steel Technology,
Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081

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

Manuscript received January 16, 2008; in revised form July 29, 2008.

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

ABSTRACT High-cycle fatigue fracture behaviors of three ferrite-pearlite type microalloyed steels with different carbon and vanadium content and one quenched and tempered (QT) low alloy steel 40Cr for comparison were investigated by rotating bending fatigue test. The results show that microstructure has a significant effect on the fatigue properties of the microalloyed forging steels. Both fatigue limit and fatigue limit ratio increase with increasing the hardness of ferrite and the fatigue limit ratio of 22MnVS steel is as high as 0.60, which is much higher than that of QT steel 40Cr. The formation of film-like ferrite along coarse prior austenite grain boundary deteriorates the fatigue properties of medium-carbon steels 38MnVS and 48MnS in as-rolled condition, which is lower than that of QT steel 40Cr. The fatigue fracture mechanism of microalloyed steels is different from that of QT steel. For the microalloyed steels, almost all the fatigue cracks initiated mainly along the boundary between ferrite and pearlite and propagated preferentially along that boundary, whereas for QT steel with same strength level, which does not possess soft phase of ferrite, the fatigue cracks easily initiated at coarse subsurface inclusions.

KEY WORDS foundational discipline in materials science, ferrite-pearlite type microalloyed medium-carbon steel, high-cycle fatigue, fatigue crack initiation and propagation, microstructure

为了降低成本,国内外先后开发了不需要调质处理而在热轧(锻)状态即可使用的中碳非调质钢,并且越来越多地用来代替调质钢,制造有疲劳强度设计

要求的运动部件如曲轴、连杆、前轴等^[1-4].这类非调质钢的微观组织多为热轧(锻)态的粗大铁素体+珠光体.与调质钢相比,其疲劳特性难以说是优良的.为改善其疲劳性能国内外研究工作者进行了大量的研究,但是只是从合金的强化机理方面探索如何提高其疲劳性能^[5,6];在疲劳破坏行为方面,尽管发现了组织状态与其疲劳性能之间的部分关系^[7,8],以及

* 国家重点基础研究发展规划 2004CB619104 资助项目.

2008 年 1 月 16 日收到初稿;2008 年 7 月 29 日收到修改稿.

本文联系人:惠卫军,教授

疲劳极限主要取决于低强度铁素体晶粒内或其晶界附近产生的疲劳裂纹停留的界限^[9], 但是对组织参数和组织状态影响其疲劳性能及疲劳裂纹萌生和扩展的具体行为还研究得较少. 本文对不同化学成分的非调质钢及相当强度的调质钢进行了旋转弯曲疲劳试验, 以进一步探讨铁素体+珠光体型非调质钢的疲劳破坏行为.

1 实验方法

实验材料为三种不同碳含量的非调质钢 22MnVS、38MnVS 和 48MnV 热轧材, 其化学成分列于表 1, 为了对比也给出了商用调质钢 40Cr 的化学成分. 22MnVS、38MnVS 和 48MnV 钢的轧材直径分别为 40 mm、90 mm 和 160 mm, 先沿棒材的 1/2 半径处掏取直径为 16 mm 的圆棒, 再将其加工成标准拉伸试样 ($l_0=5d_0$, $d_0=5$ mm) 和旋转弯曲疲劳试样 (标距段直径为 5.97 mm, 长度为 30 mm). 先将调质钢 40Cr 改锻成直径 16 mm 长度 900 mm 的圆棒, 再加工成拉伸及疲劳毛坯试样, 将其调质处理 (淬火 860 °C ×30 min, 油冷+回火 630 °C ×90 min, 空冷) 后再精加工成成品.

按照 GB/T 4337-1984 进行旋转弯曲疲劳实验, 实验所用设备为国产 PQ1-6 型旋转弯曲疲劳实验机. 实验机为四点加力, 实验速度为 5000 rpm, 实验循环特征为 $R=-1$, 实验一直进行到试样失效或达到 10^7 次时为止, 用升降法求疲劳极限. 为了观察疲劳裂纹在试样表面萌生及扩展情况的试样, 先机械抛光或电解抛光并浸蚀后, 再进行疲劳实验, 疲劳过程中每隔一定周次用立体显微镜对表面裂纹萌生及扩展进行观察. 实验在实验室环境室温下进行.

将从疲劳试样上切取的金相试样用 3% 的硝酸酒精溶液浸蚀后, 在光学显微镜下观察微观组织特征并用 SISC IAS V8.0 金相图像分析软件测量组织中的铁素体体积百分比. 分别用 TIME HV-10A、MVK-E 型维氏硬度计上测量疲劳试样的维氏硬度 (10 kg) 及微观组织 (珠光体、铁素体) 的显微硬度 (50 g), 实验结果均为 5 个有效数据的平均值. 在试样的心部部位完成硬度的测量和组织的观察. 用日立 S-4300 型

场发射 SEM 观察疲劳断口的形貌及疲劳裂纹在试样表面的萌生及扩展情况.

2 结果与讨论

2.1 不同微观组织非调质钢的疲劳性能

实验用非调质钢的微观组织均为铁素体+珠光体, 其中碳含量低的 22MnVS 钢为等轴铁素体+珠光体, 碳含量较高的 38MnVS 和 48MnV 钢为沿原奥氏体晶界析出的网状铁素体+珠光体 (图 1a、b、c); 40Cr 钢调质处理后的微观组织为高温回火马氏体 (图 1d).

从表 2 可见, 非调质钢中铁素体硬度均低于珠光体硬度, 铁素体是组织中的软相; 随着钢中 C 含量的增加, 组织中的铁素体体积分数降低, 材料维氏硬度和珠光体硬度提高, 而铁素体硬度却反而降低. 这主要与实验钢热轧材的原始规格及 V 元素的含量有关, 轧材原始规格小和 V 元素含量高, 增加了 V(C, N) 在铁素体中的弥散析出强化效果; 在三种非调质钢中, 22MnVS 钢的铁素体体积分数 V_f 最大, 珠光体/铁素体硬度比 H_P/H_F 最小.

实验钢的旋转弯曲疲劳 S-N 曲线及疲劳实验结果的汇总分别列于图 2 和表 3. 可以看出, 除 22MnVS 钢外, 其它两种非调质钢的疲劳性能均比调质钢 40Cr 的差, 其疲劳极限与疲劳极限比均明显低于 40Cr 钢, 由于强度的影响, 22MnVS 钢的疲劳极限低于 40Cr 钢, 但是其疲劳极限比 $\sigma_{-1}/R_m=0.60$, 明显高于 40Cr 钢的疲劳极限比 0.50. 三种非调质钢的疲劳性能并非随其抗拉强度的提高而提高, 反而随着抗拉强度的提高而下降, 即 22MnVS 钢的疲劳性能最好, 38MnVS 钢次之, 48MnV 钢的疲劳性能最差. 这与其微观组织参数及形态有关. 一方面铁素体的强度影响了裂纹的萌生及扩展 (见下节分析), 铁素体强度高, 铁素体-珠光体边界处裂纹萌生及扩展所需应力增大, 非调质钢的疲劳极限提高; 另一方面随着非调质钢中 C 元素含量的增加, 提高了微观组织中珠光体体积分数, 细化了铁素体晶粒尺寸, 铁素体沿着珠光体边界连接成薄片网状, 降低了疲劳性能. 因为热轧态粗大的网状铁素体-珠光体非调质钢疲劳性能

表 1 实验钢的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of the four tested steels (mass fraction, %)

Steel	C	Si	Mn	P	Cr	S	V	O	N
22MnVS	0.23	0.33	0.78	0.026	0.19	0.065	0.24	0.0016	0.010
38MnVS	0.39	0.20	1.38	0.016	0.17	0.059	0.11	0.0016	0.011
48MnV	0.47	0.26	1.15	0.016	0.12	0.007	0.07	0.0011	0.012
40Cr	0.38	0.28	0.71	0.007	0.87	0.008	-	0.0051	0.009

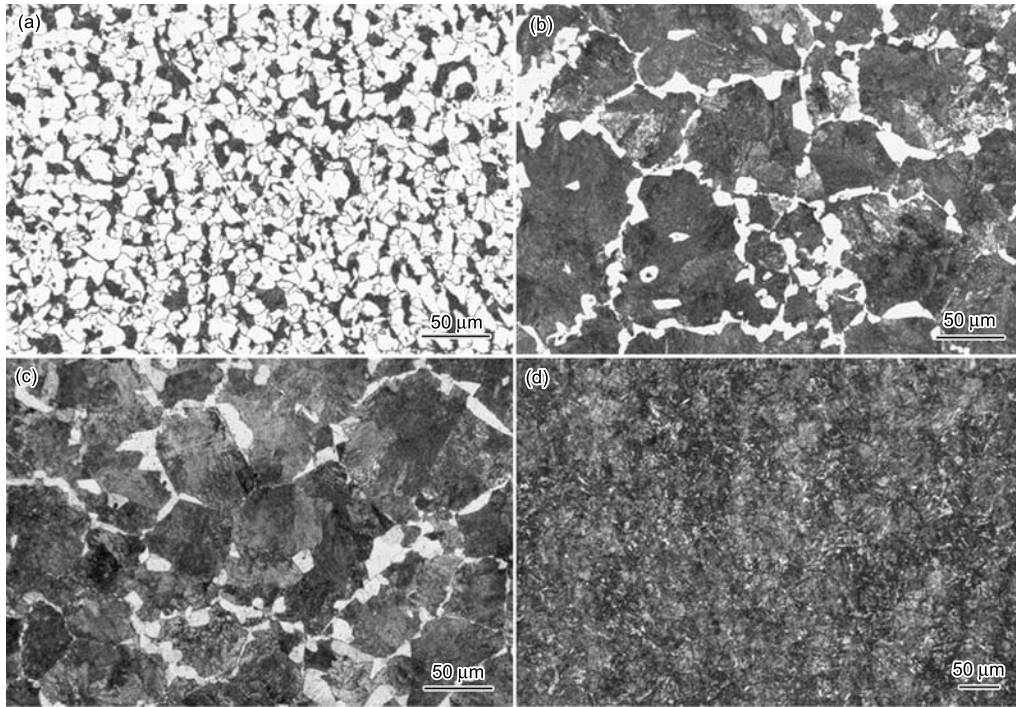


图1 实验钢的金相微观组织形貌

Fig.1 Optical microstructures of the tested steels consist of ferrite (white) and pearlite (grey) for 22MnVS (a), 38MnVS (b) and 48MnV (c) and of tempered martensite for 40Cr (d)

表2 实验钢硬度和有关微观组织参数的测定结果

Table 2 Hardness and microstructural parameters of the tested steels

Steel	Vickers	Microhardness	Microhardness	H_P/H_F	Volume fraction
	hardness	of pearlite H_P	of ferrite H_F		of ferrite V_f
	HV10	(HV0.05)	(HV0.05)		(%)
22MnVS	226	255	217	1.18	75.3
38MnVS	266	275	210	1.31	13.1
48MnV	273	281	201	1.40	9.9
40Cr	254	—	—	—	—

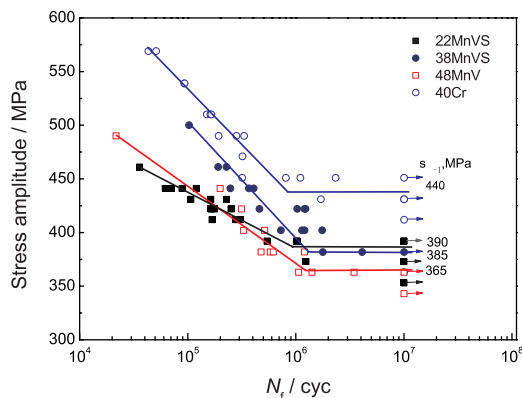


图2 实验钢的旋转弯曲疲劳实验的 S-N 曲线

Fig.2 S-N curves obtained by rotating bar two-point bending fatigue tests for the tested steels

较差, 其低于同等强度调质钢的疲劳性能^[10].

2.2 疲劳裂纹的萌生和扩展

非调质钢疲劳断裂绝大部分起源于试样表面基体, 个别起源于试样亚表面的粗大夹杂物 (图 3a,b); 而同等强度级别的 40Cr 调质钢的疲劳裂纹则有 50% 起源于亚表面的粗大夹杂物 (图 3c). 在非调质钢疲劳断口的扩展区, 存在明显的珠光体片层状解理结构 (图 3d), 这可能是疲劳裂纹在珠光体内扩展的结果, 图中 A、B 为珠光体内不同片层. 图 4 为疲劳裂纹沿试样表面组织萌生及扩展的 SEM 照片, 进一步说明疲劳裂纹萌生于试样表面并主要萌生于表面的铁素体 - 珠光体边界处 (图 4a), 扩展主要也沿铁素体 - 珠光体边界 (图 4b).

其原因是, 疲劳破坏与组织中的应力应变集中有很大的关系. 对于铁素体 - 珠光体型非调质钢,

表 3 实验钢的强度及疲劳性能汇总

Table 3 Summary of tensile strength and fatigue limit of the tested steels

Steel	Tensile strength R_m /MPa	Fatigue limit σ_{-1} /MPa	Fatigue limit ratio σ_{-1}/R_m
22MnVS	655	390	0.60
38MnVS	885	385	0.44
48MnV	895	365	0.41
40Cr	880	440	0.50

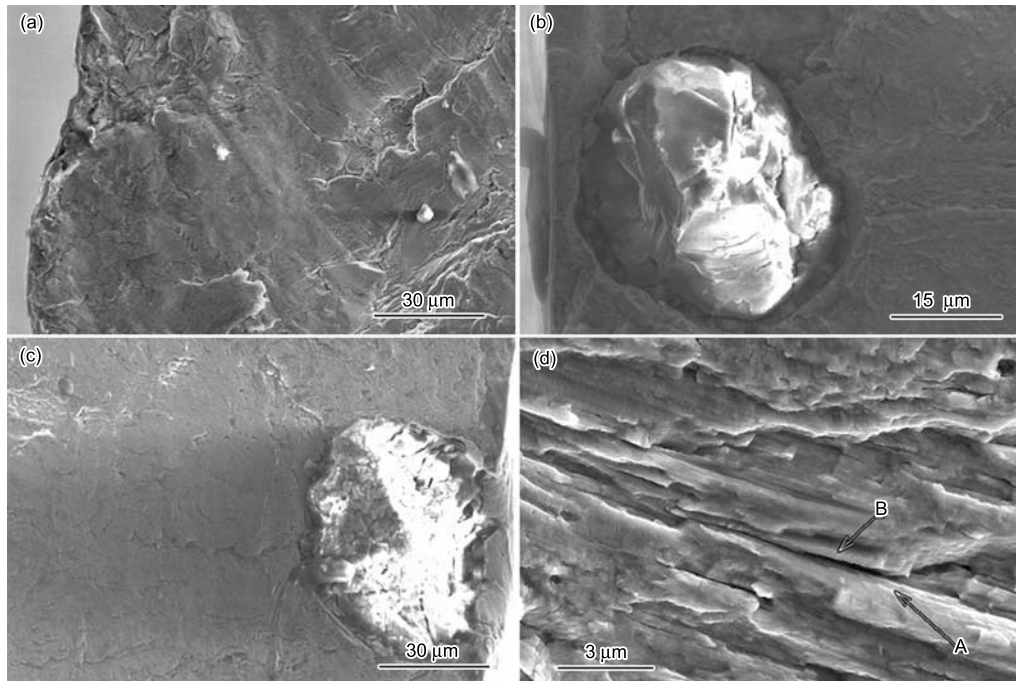


图 3 实验钢疲劳断口裂纹源区及扩展区形貌

Fig.3 SEM fractographs of fatigue fracture initiation and propagation, showing that cracks initiated from surface matrix of 22MnVS steel (a) and subsurface inclusion of 38MnVS (b) and 40Cr (c) steels and propagated within pearlite when the normal stress is vertical to pearlite layers of 38MnVS steel (d)

表 4 实验钢疲劳裂纹萌生源统计结果

Table 4 Statistical results of various fatigue crack initiation sites of the tested steels

Steel	Condition	Number of specimens with various fatigue crack initiation sites		
		I	SSI	SM
22MnVS	As-hot rolled	1	1	15
38MnVS	As-hot rolled	1	0	13
48MnV	As-hot rolled	0	0	12
40Cr	QT	0	7	7

Note: I refers to initiation at internal inclusion; SSI refers to initiation at subsurface inclusion; SM refers to initiation at surface matrix

当外加应力超过铁素体屈服强度而低于珠光体屈服强度时,组织中的铁素体开始屈服变形并产生滑移带,随着疲劳周次的增大,在铁素体/珠光体边界产生较大的应变应力集中;当应力达到珠光体屈服强度时,珠光体也开始屈服变形,在铁素体/珠光体边界

和靠近铁素体一侧出现明显的塑性应变集中,部分铁素体/珠光体边界及珠光体内部出现明显的正应力集中.故铁素体-珠光体型非调质钢的疲劳裂纹易萌生于试样的表面铁素体-珠光体边界;正应力是形核后的微裂纹长大扩展的主要驱动力.

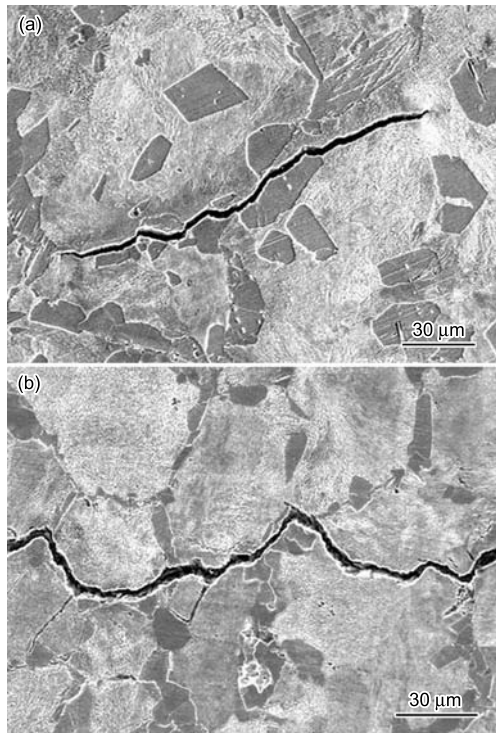


图4 38MnVS 钢旋转变曲疲劳试样表面疲劳裂纹萌生及扩展的 SEM 形貌

Fig.4 SEM photographs of rotating bending fatigued specimen of 38MnVS steel in as-annealed (1200 °C ×45 min) (a) and as-rolled (b) conditions, showing cracks initiated along the boundary of ferrite and pearlite and propagated preferentially along that boundary

因此, 铁素体相的硬度和强度影响疲劳裂纹的萌生及扩展, 铁素体强度高, 铁素体/珠光体边界处裂纹萌生及扩展所需的应力就高, 非调质钢的疲劳极限提高。铁素体 - 珠光体型非调质钢的疲劳极限比 σ_{-1}/R_m 与 $H_F/(H_F V_F + H_P V_P)$ 成正比^[6], 即: $\sigma_{-1}/R_m \propto H_F/(H_F V_F + H_P V_P) \propto 1/[V_F + (1 - V_F)H_P/H_F]$ 。这表明, 采取措施如钢中添加微合金化元素产生析出强化和细化铁素体晶粒, 提高铁素体硬度、降低珠光体/铁素体硬度比能够提高铁素体 - 珠光体型非调质钢的疲劳极限比^[8,10]。由于 V 元素对铁素体的强化作用, V 含量最高的 22MnVS 钢的疲劳极限比明显高于其它非调质钢, 甚至明显高于调质钢 40Cr。同等强度水平的调质钢不存在像铁素体那样的软相, 因而易在试样表层粗大的硬脆夹杂物处产生应力集中而萌生疲劳裂纹。

3 结 论

1. 铁素体 - 珠光体型非调质钢的疲劳性能主要取决于其组织参数及形态。提高铁素体相硬度, 其

疲劳极限及疲劳极限比均提高, 疲劳极限比最高可达 0.60, 远高于调质钢的 0.50; 具有粗大的网状铁素体 - 珠光体组织的热轧态疲劳性能较差, 低于同等强度水平的调质钢。

2. 铁素体 - 珠光体型非调质钢的疲劳断裂机制与调质钢的不同, 其疲劳裂纹基本上萌生于试样表面的铁素体/珠光体边界, 并优先沿着铁素体/珠光体边界扩展。对于同等强度水平的调质钢, 由于不存在像铁素体那样的软相, 疲劳裂纹易在试样表层粗大的夹杂物处萌生。

参 考 文 献

- DONG Chengrui, REN Haipeng, JIN Tongzhe, *Microalloyed Non-quenched and Tempered Steels* (Beijing, Metallurgical Industry Press, 2000) p.1 (董成瑞, 任海鹏, 金同哲, 微合金非调质钢 (北京, 冶金工业出版社, 2000) p.1)
- D.J.Naylor, Review of international activity on microalloyed engineering steels, *Ironmaking and Steelmaking*, **16**(4), 246(1989)
- D.J.Milbourn, Air-cooled forging steels for automotive applications, *Steel Times*, **224**(10), 351(1996)
- H.Kubo, H.Mori, Technical developments and recent trends in crankshaft materials, *Kobelco Technology Review*, (26), 37(2005)
- P.Farsetti, A.Blarasin, Fatigue behaviour of microalloyed steels for hot-forged mechanical components, *Int. J. Fatigue*, **10**(3), 153(1988)
- ZHA Xiaoqin, HUI Weijun, YONG Qilong, DONG Han, WENG Yuqing, LONG Jinmin, Effect of vanadium on the fatigue properties of microalloyed medium-carbon steels, *Acta Metall. Sinica*, **43**(7), 719(2007) (查小琴, 惠卫军, 雍岐龙, 董瀚, 翁宇庆, 龙晋明, 钒对中碳非调质钢疲劳性能的影响, *金属学报*, **43**(7), 719(2007))
- H.Yaguchi, T.Tsuchida, Y.Matsushima, S.Abe, K.Iwasaki, A.Inada, Effect of microstructures on the fatigue behavior of V-added ferrite-pearlite type microalloyed steels, *Kobelco Technology Review*, (25), 59(2002)
- S.Sankaran, V.S.Sarma, K.A.Padmanabhan, Low cycle fatigue behavior of a multiphase microalloyed medium carbon steel: comparison between ferrite - pearlite and quenched and tempered microstructures, *Mater. Sci. & Engng.*, A345, 328(2003)
- S.Nishida, N.Hattori, H.Kubota, H.Nisitani, Effect of carbon on fatigue crack initiation of plain carbon steels, *Trans. JSME*, **61A**(590), 2134(1995) (西田新一, 服部信彦, 久保田浩史, 西谷弘信, フェライト 均晶粒徑をえた SC 材の高サイクル疲き裂萌生に及ぼす炭素量の影祐, *日本机械学会译文集 A*, **61A**(590), 2134(1995))
- ZHA Xiaoqin, HUI Weijun, YONG Qilong, DONG Han, WENG Yuqing, LONG Jinmin, Effect of microstructure on the fatigue properties of microalloyed medium-carbon steel, *Heat Treatment of Metals*, **32**(6), 92(2007) (查小琴, 惠卫军, 雍岐龙, 董瀚, 翁宇庆, 龙晋明, 微观组织对中碳微合金非调质钢疲劳性能的影响, *金属热处理*, **32**(6), 92(2007))