

一种新型非调质钢弯曲疲劳性能的试样尺寸效应*

赵 阳 陈礼清 刘相华

(东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室 沈阳 110004)

摘 要 使用液压伺服疲劳试验机考察一种新型 (汽车前轴用)Nb+V 复合微合金非调质钢的疲劳行为, 绘制出 S-N 曲线并分析了疲劳断口特征, 研究了其三点弯曲疲劳性能的试样尺寸效应及其原因. 结果表明, 试样的尺寸对非调质钢的三点弯曲疲劳性能有显著的影响, 其三点弯曲疲劳极限随着试样尺寸的减小而增加, 但是试样尺寸对疲劳试样的断口形貌几乎没有影响; 在三点弯曲疲劳试验中, 试样尺寸效应源于试样内部的应力梯度, 小尺寸试样的应力梯度比大尺寸试样的高.

关键词 金属材料, 三点弯曲疲劳, 尺寸效应, 微合金化, 非调质钢

分类号 TG111

文章编号 1005-3093(2009)04-0444-05

Effect of specimen size on bending fatigue behavior of a new kind of micro-alloyed forging steel

ZHAO Yang CHEN Liqing** LIU Xianghua

(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004)

* Supported by Program for New Century Excellent Talents in University No.NCET-06-0285 and Foundation for Innovation Team, the Education Department, Liaoning Province.

Manuscript received January 16, 2009; in revised form May 5, 2009.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(024)83681819, E-mail: lqchen@mail.neu.edu.cn

ABSTRACT The three-point-bending fatigue behaviors of a new kind of Nb+V micro-alloyed forging steel for truck front axle have been studied by hydraulic servo fatigue testing machine. The effects of specimen size on the fatigue behavior and its origin have been considered. The S-N curves were plotted and the fatigue cracked surfaces were analyzed by SEM. The results showed that the specimen size has a significant influence on three-point-bending fatigue limit. The three-point-bending fatigue limit of specimen increased with decreasing the specimen size. There is little effect of specimen size on the morphology of fatigue fractured surfaces. The reasons for this specimen size effect are that there exist stress gradient in specimen for three-point-bending fatigue test and that the stress gradient in a smaller specimen is larger than that in a larger one.

KEY WORDS metallic materials, three-point-bending fatigue, specimen size effect, micro-alloying, forging steel

非调质钢具有节能、环保和成本低等优点, 日本、德国和美国等汽车制造商已采用中低碳 V 微合金非调质钢制造连杆、曲轴、半轴和前轴等零部件^[1-5]. 高韧性化一直是非调质钢的发展方向和重要的研究课题, 采取的措施主要有低碳和复合微合金化. Nb+V 复合微合金低碳非调质钢是一种新近研发的汽车用钢, 能满足前轴的强韧性要求^[6]. 前轴是汽车前桥中的重要保安件之一, 既要承受垂直平面的交

变弯矩, 又要承受一定的冲击载荷, 其失效形式主要是疲劳断裂, 研究其疲劳行为有重要的实际意义. 前轴的实际受力状态为三点或四点弯曲状态, 虽然采用三点或四点弯曲疲劳试验能更加真实地描述其疲劳行为, 但是关于三点或四点弯曲疲劳试验迄今均没有统一的标准. 即便研究者们采用不同尺寸的试样进行三点弯曲疲劳行为研究时^[7-9], 也未从本质上考虑试样尺寸对其疲劳行为的影响.

针对上述问题, 本文以一种新型汽车前轴用 Nb+V 复合微合金非调质钢为对象, 采用液压伺服疲劳试验机研究两种不同尺寸 (比例试样) 非调质钢的三点弯曲疲劳行为, 研究试样尺寸对三点弯曲疲劳极限的影响及其机理.

* 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 NCET-06-0285 和辽宁省教育厅创新团队基金项目资助.

2009 年 1 月 16 日收到初稿; 2009 年 5 月 5 日收到修改稿.

本文联系人: 陈礼清, 教授

表 1 试验用 Nb+V 复合微合金非调质钢化学成分 (% , 质量分数)
Table 1 Chemical composition of Nb+V micro-alloyed forging steel (mass fraction)

C	Mn	Si	Cr	S	P	V	Nb	N	O
0.24	1.99	0.30	0.51	0.050	0.008	0.08	0.07	0.0050	0.0018

1 试验方法

试验用钢在 150 Kg 中频真空感应炉中冶炼, 其化学成分列于表 1, Nb 和 V 的总量为 0.15%, 该钢属于低碳复合微合金非调质钢. 将切除头尾缺陷的铸锭在 1200 °C 加热炉中保温 1 h 后, 锻造成直径为 30 mm 的圆棒, 终锻温度控制在 850 °C 以上, 锻后空冷.

沿棒材的轴向截取三点弯曲疲劳试样并在 FTM-100 型液压伺服疲劳试验机上进行三点弯曲疲劳试验. 大、小比例试样尺寸分别为 20 mm×20 mm×150 mm(跨距为 100 mm) 和 10 mm×10 mm×75 mm(跨距为 50 mm), 加载频率为 25 Hz, 应力比 $R(\sigma_{\min}/\sigma_{\max})$ 为 0.1, 循环应力振幅为常振幅正弦. 根据式

$$\sigma = \frac{3PL}{2BH^2} \quad (1)$$

可以得到材料的弯曲强度, 其中 σ 为试样表面的最大应力, P 为载荷, L 为跨距, B 为试样宽度, H 为试样高度.

试验一直进行到试样断裂或 10^7 次时为止. 试验中采用升降法求疲劳极限, 有效试样数量为 13 根, 试验在 3-5 级应力水平下进行, 应力增量为预计疲劳极限的 3%-5%, 第 1 根试样的应力水平应略高于预计的疲劳极限. 根据上一根试样的试验结果 (破坏或通过), 决定下一根试样的应力水平 (降低或升高), 直至完成全部试验. 第一对相反结果以前的数据, 如在以后数据的应力波动范围之内, 则作为有效数据加以利用, 即在试验过程中应陆续将其平移到第一对相反结果之后, 作为该试样所在应力水平下的第 1 个有效数据. 疲劳极限 $\sigma_{0.1bending}$ (MPa) 为

$$\sigma_{0.1bending} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n v_i \sigma_i \quad (2)$$

其中 m 为有效试验的总次数, n 为试验应力水平数, σ_i 为第 i 级应力水平, v_i 为第 i 级应力水平下的试验次数 ($i=1, 2, \dots, n$).

取 5 级应力水平, 以用升降法测得的疲劳极限作为 S-N 曲线的低应力水平点, 对于其它 4 级较高应力水平下的试验, 则用成组试验法, 每组试样数量的分配, 取决于试验数据的分散度和所要求的置信度, 并随着应力水平的降低而逐渐增加, 用该方法测定的

S-N 曲线具有 50% 的存活率.

疲劳试验完成后, 在 FEI QUANTA 600 型扫描显微镜下观察试样的疲劳断口. 沿棒材的轴向截取标准拉伸试样 ($l_0=5d_0$, $d_0=10$ mm) 和冲击试样, 按 GB/T228-2002 和 GB/T229-1994 要求, 对试验钢进行了力学性能测试.

2 结果与讨论

测得试验钢的屈服强度 σ_s 为 765 MPa, 抗拉强度 σ_b 为 910 MPa, 延伸率 δ 为 15%, 断面收缩率 Ψ 为 49%, 冲击韧性 α_{ku2} 为 81 J/cm².

Nb 和 V 是广泛使用的微合金化元素, 具有在加热时阻止奥氏体晶粒长大和奥氏体再结晶的作用. 在锻造加热时, 未溶解的 Nb 和 V 的碳氮化物将钉扎奥氏体晶粒^[6], 使之基本不长大或缓慢地长大, 因而提高了晶粒粗化温度, 细化了钢的原始组织. 此外, 锻造时析出的 Nb 和 V 的碳氮化物沉淀在晶界和位错上, 起钉扎作用, 从而阻止了再结晶和位错的运动, 抑制再结晶过程的进行, 使 Nb-V 微合金化钢的晶粒得到细化. 钢的疲劳极限与晶粒尺寸也符合 Hall-Petch 关系^[10,11], 即晶粒尺寸越小, 钢的疲劳极限就越高. 通过 Nb-V 复合微合金化处理, 可以有效地细化钢的原始奥氏体晶粒^[12], 从而进一步细化钢的晶粒, 提高其疲劳极限. Farsetti 等的研究表明^[13], 通过 Nb-V 复合微合金化, 800MPa 级别的低 C 高 Mn 微合金非调质钢的疲劳极限高于相同强度级别调质钢的疲劳极限. 对于 900MPa 级及其以上的非调质钢, 本文的实验结果也证实了这一点.

图 1 为两种不同尺寸试样的三点弯曲疲劳试验的 S-N 曲线, 小尺寸试样的三点弯曲疲劳极限 $\sigma_{0.1bending}^{\text{smaller}}=963$ MPa, 大尺寸试样的三点弯曲疲劳极限 $\sigma_{0.1bending}^{\text{larger}}=835$ MPa. 由图 1 可见, 小尺寸试样的疲劳性能高于大尺寸试样的疲劳性能, 即在相同的应力水平下, 前者的疲劳寿命要高于后者.

试样尺寸对三点弯曲疲劳性能的影响可以用 Peterson^[14] 提出的理论结合应力梯度来解释. Peterson 认为, 疲劳极限取决于试样内部距试样表面某一特定距离 δ 处的应力 σ_B , 该应力与试样尺寸无关, 为一定值. Findley^[15] 认为 δ 只是试样晶粒尺寸的函数, 与材料的其他参数无关. 图 2 表明, 小尺寸试样的应力梯度大于大尺寸试样的应力梯度, 在距试样表面同一距离 δ 处, 小尺寸试样的应力要小于大尺寸试样的

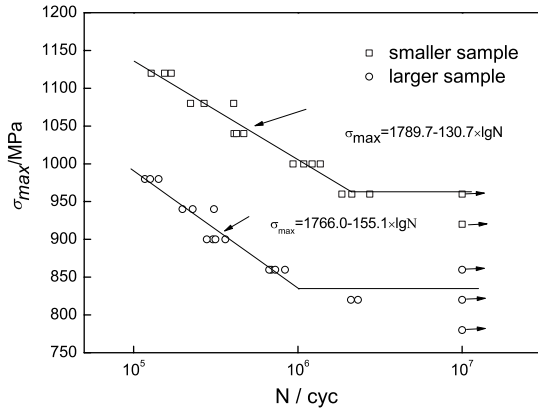


图1 Nb+V 微合金非调质钢的三点弯曲疲劳 S-N 曲线

Fig.1 S-N curves of Nb+V micro-alloyed forging steel obtained by three-point-bending fatigue test

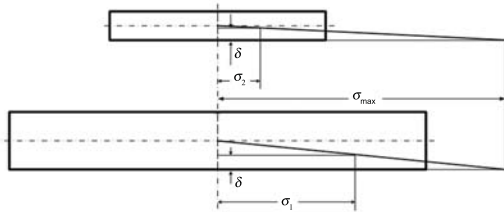


图2 不同尺寸试样在受到相同最大应力时的应力梯度分布情况

Fig.2 Stress gradient of different sizes of specimen under the same maximum stress

应力. 于是便出现下述情况: 在不同尺寸的试样受到同样最大应力时, 大尺寸试样发生断裂, 而小尺寸试样不发生断裂, 也即其疲劳寿命高于大尺寸试样, 这就从理论上定性地解释了试样尺寸对三点弯曲疲劳性能的影响.

值得注意的是, 材料的疲劳极限并不随着试样

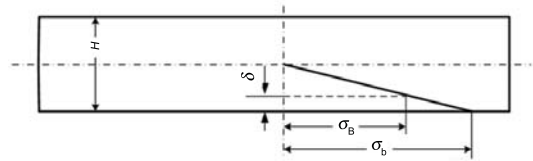


图3 三点弯曲疲劳试样的受力分析

Fig.3 Stress analysis of specimen for three-point-bending fatigue test

尺寸的增加而一直减小, 而是逐渐趋于一个稳定值 σ_B ^[14], 也可以把 σ_B 看做材料的本质疲劳极限^[15], 其大小与材料的屈服强度和抗拉强度无必然联系.

根据图3所示三点弯曲疲劳试样的受力情况, 可得

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_B} = \frac{\frac{H}{2}}{\frac{H}{2} - \delta} \quad (3)$$

化简后可得

$$\sigma_b = \frac{\sigma_B}{1 - \frac{2\delta}{H}} \quad (4)$$

其中 σ_b 为计算出的高度为 H 的试样的疲劳极限, σ_B 为试样较大尺寸时不再随试样尺寸变化的疲劳极限, δ 为试样内部距试样表面某一特定距离.

可以看出, 对于某一特定的材料, σ_B 和 δ 为定值, 材料的三点弯曲疲劳极限取决于试样的高度 H, 随着 H 的减小, 试样的疲劳极限增加. 根据式 (4) 和以上的试验结果, 可以计算出 $\delta=1.17$ mm, $\sigma_B=737$ MPa. 即对于该非调质钢, 当距试样下表面 1.17 mm 处的应力大于 737 MPa 时, 经过一定次数的疲劳循环后试样就发生断裂; 当此处的应力小于或等于 737 MPa 时, 试样在基数为 10^7 疲劳循环次数下不发生断裂. 但是, 式 (4) 具有一定的局限性, 也即式 (4) 中试样的高度 H 不能小于或等于 2δ . 同时, 试样的高度 H 也不能太接近于 2δ ; 否则 σ_b 将趋于无限

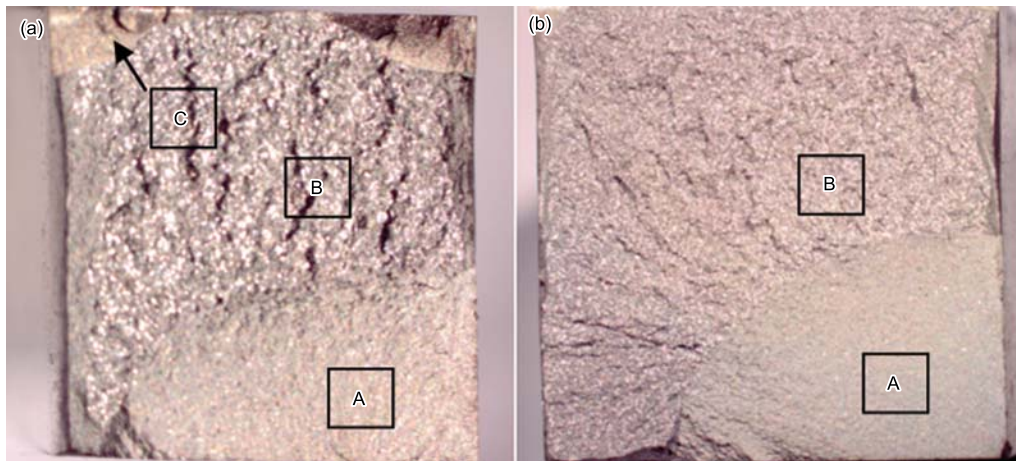


图4 小尺寸 (a) 及大尺寸试样 (b) 的 Nb+V 微合金非调质钢的疲劳断口

Fig.4 Fatigue fractured surfaces of Nb+V micro-alloyed forging steel (a) smaller specimen (b) larger specimen

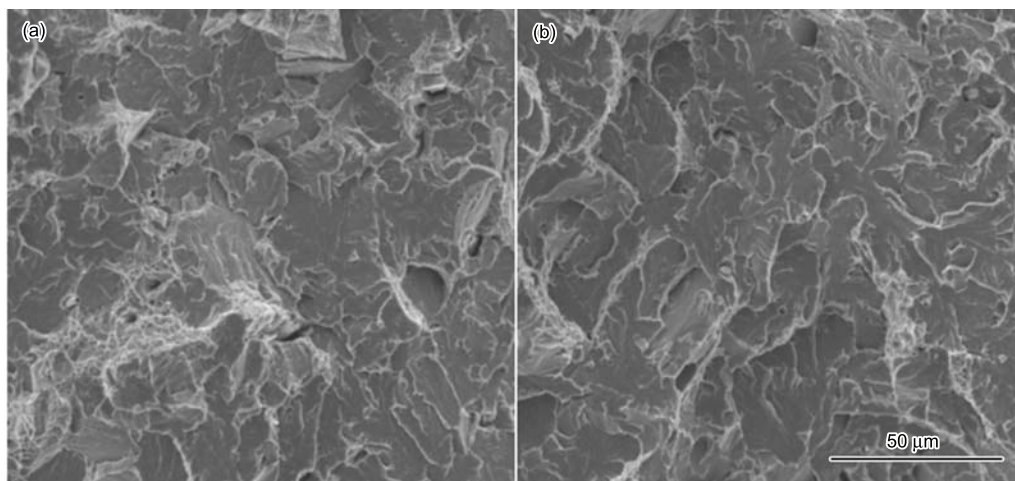


图 5 小尺寸 (a) 及大尺寸试样 (b) 的 Nb+V 微合金非调质钢疲劳裂纹扩展区 SEM 形貌
Fig.5 SEM micrographs showing fatigue crack propagation of Nb+V micro-alloyed forging steel
(a) smaller specimen (b) larger specimen

大. 应力比 R 和其他影响试样应力梯度分布的因素, 如试样的跨距等也影响试样的三点弯曲疲劳极限.

疲劳断口分为疲劳源区、疲劳扩展区和瞬断区. 图 4 为试验钢的宏观疲劳断口, 其中 A 区为疲劳源区, B 区为疲劳扩展区, C 区为瞬断区. 可以发现, 无论是哪种尺寸的试样, 裂纹源均萌生于试样下表面靠近棱角的位置, 且其疲劳源区的面积约占整个疲劳断口的三分之一左右, 剩下的部分为疲劳扩展区. 对于小尺寸试样, 还存在着瞬断区, 但其面积很小, 与整个疲劳断口相比可以忽略不计. 可见, 试样尺寸对疲劳试样的断口形貌几乎没有影响. 对小尺寸和大尺寸试样所有疲劳断口的 SEM 观察表明, 在整个疲劳裂纹扩展区内全部以准解理断裂为主 (图 5).

3 结 论

1. 试样的尺寸对 Nb+V 微合金非调质钢三点弯曲疲劳性能有显著的影响. 在本文试验条件下, $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ 试样的三点弯曲疲劳极限为 963 MPa, $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 试样的三点弯曲疲劳极限为 835 MPa. 小尺寸试样的三点弯曲疲劳极限高于大尺寸试样, 即相同应力水平下小尺寸试样的疲劳寿命高于大尺寸试样; 试样尺寸对弯曲疲劳断口几乎没有影响.

2. 疲劳试样内部的应力梯度是引起这种尺寸效应的主要原因, 凡影响三点弯曲疲劳试样应力梯度分布的因素, 均影响三点弯曲试样的疲劳性能.

感谢张福波副教授对本文试验工作的大力支持.

参 考 文 献

1 M.J.Balart, C.L.Davis, M.Strangwood, Fracture behaviour in medium-carbon Ti-V-N and V-N microalloyed ferritic-pearlitic and bainitic forging steels with enhanced machinability, *Materials Science and Engineering A*,

328(1-2), 48(2002)

- 2 M.L.N.da Silva, W.Regone, S.T.Button, Microstructure and mechanical properties of microalloyed steel forgings manufactured from cross-wedge-rolled performs, *Scripta Materialia*, **54**(2), 213(2006)
- 3 F.A.Khalid, Precipitation and compositional changes in the structural phases of microalloyed automotive steels, *Materials Science and Engineering A*, **325**(1-2), 281(2002)
- 4 M.Jahazi, B.Eghbali, The influence of hot forging conditions on the microstructure and mechanical properties of microalloyed steels, *Journal of Materials Processing Technology*, **113**(1-3), 594(2001)
- 5 M.A.Linaza, L.J.Remero, J.M.Rodriguez, J.J.Urcola, Cleavage fracture of microalloyed forging steels, *Scripta Metallurgica et Materialia*, **32**(3), 395(1995)
- 6 ZHAO Yang, CHEN Liqing, XU Xiangqiu, LIU Xianghua, Microstructure and mechanical properties of a kind of Nb-V micro-alloyed forging steel, *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, **30**(6), 821(2009)
(赵 阳, 陈礼清, 徐香秋, 刘相华, 一种 Nb-V 复合微合金化非调质钢的组织 and 性能, *东北大学学报 (自然科学版)*, **30**(6), 821(2009))
- 7 K.Katagiri, S.Sato, N.Tsuchiya, K.Kasaba, Bending fatigue characteristics of DyBaCuO bulk superconductor, *Physica C: Superconductivity*, **468**(15-20), 1424(2008)
- 8 J.A.M.Ferreira, J.D.M.Costa, V.Lapat, Fatigue behaviour of 42CrMo4 steel with PVD coatings, *International Journal of Fatigue*, **19**(4), 294(1997)
- 9 S.P.Wang, Y.J.Li, M.Yao, R.Z.Wang, Fatigue limits of shot-peened metals, *Journal of Materials Processing Technology*, **73**(1-3), 57(1998)
- 10 YANG Zhenguo, ZHANG Jiming, LI Shouxin, CHU Zuoming, HUI Weijun, WENG Yuqing, Fatigue behavior of fine-grained high strength steel 42CrMoVNb, *Acta Metallurgica Sinica*, **40**(4), 367(2004)
(杨振国, 张继明, 李守新, 歹作明, 惠卫军, 翁宇庆, 42CrMoVNb 细晶高强度钢的疲劳行为, *金属学报*, **40**(4), 367(2004))

- 11 R.W.Armstrong, The influence of polycrystal grain size on several mechanical properties of materials, Metallurgical Transactions, **1**(5), 1169(1970)
- 12 ZHANG Wenhan, WANG Maoqiu, SHI Jie, HUI Weijun, DONG Han, WU Run, Effect of vanadium–niobium microalloying on properties of Cr–Ni–Mo heavy duty gear steel, Materials for Mechanical Engineering, **31**(6), 31(2007)
(张文汉, 王毛球, 时捷, 惠卫军, 董瀚, 吴润, 钒–铌微合金化对铬–镍–钼系重载齿轮钢性能的影响, 机械工程材料, **31**(6), 31(2007))
- 13 P.Farsetti, A.Blarasin, Fatigue behaviour of microalloyed steels for hot–forged mechanical components, International Journal of Fatigue, **10**(3), 160(1998)
- 14 R.B.Heywood, Designing against fatigue, (London, Chapman and Hall LTD, 1962) p.32
- 15 W.N.Findley, An explanation of size effect in fatigue of metals, Journal of Mechanical Engineering Science, **14**(6), 424(1972)