

DOI: 10.11973/jxgccl202308004

晶粒尺寸对 IF 钢低周疲劳行为及疲劳后显微组织的影响

魏晨羲^{1,2,3}, 李 凯², 杨蔚涛^{2,3}, 祝向荣⁴, 杨 旗^{2,3}

(1. 上海第二工业大学资源与环境工程学院, 上海 201209; 2. 上海材料研究所有限公司, 上海 200437; 3. 上海市工程材料应用与评价重点实验室, 上海 200437; 4. 上海第二工业大学能源与材料学院, 上海 201209)

摘要: 通过 850, 950 °C 退火制备得到平均晶粒尺寸分别为 40, 210 μm 的 IF 钢, 研究了晶粒尺寸对其低周疲劳行为和疲劳后显微组织的影响。结果表明: 在疲劳循环过程中, 细晶试验钢的初始平均峰值应力高于粗晶试验钢, 随着循环次数增加, 2 种试验钢的平均峰值应力趋于相近; 细晶试验钢始终表现为循环加工硬化, 粗晶试验钢表现为初始循环硬化、循环饱和和二次循环硬化。经 400 周次疲劳循环后, 细晶试验钢的显微组织由尺寸相近且分布均匀的位错胞组成, 粗晶试验钢的显微组织主要由宏观驻留滑移带 (Macro-PSB) 和位错胞组成, Macro-PSB 中包含较为细小的位错胞; 粗晶试验钢具有较高的位错密度及相对显著的组织不均匀性。

关键词: IF 钢; 晶粒尺寸; 显微组织; 低周疲劳行为

中图分类号: TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2023)08-0023-06

Effect of Grain Size on Low Cycle Fatigue Behavior and Microstructure after Fatigue of IF Steel

WEI Chenxi^{1,2,3}, LI Kai², YANG Weitao^{2,3}, ZHU Xiangrong⁴, YANG Qi^{2,3}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 2. Shanghai Research Institute of Materials Co., Ltd., Shanghai 200437, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Engineering Materials Application and Evaluation, Shanghai 200437, China; 4. School of Energy and Materials, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: IF steels with average grain size of 40 μm and 210 μm were prepared by annealing at 850 °C and 950 °C, respectively. The effects of the grain size on the low-cycle fatigue behavior and the microstructure after fatigue were investigated. The results show that during fatigue cycle, the initial average peak stress of the fine-grained test steel was higher than that of the coarse-grained test steel. The average peak stress of the two test steels tended to be equal with increasing number of cycles. The fine-grained test steel always showed cyclic work hardening during fatigue, while the coarse-grained test steel showed initial cycle hardening, cycle saturation and secondary cycle hardening. After 400 fatigue cycles, the microstructure of the fine-grained test steel was composed of similarly sized and uniformly distributed dislocation cells, while the microstructure of the coarse-grained test steel was mainly composed of macro-persistent slip band (Macro-PSB) and dislocation cells. The Macro-PSB contained relatively small dislocation cells. The coarse-grained test steel had higher dislocation density and relatively significant structural heterogeneity.

Key words: IF steel; grain size; microstructure; low cycle fatigue behaviour

0 引言

低屈服点(超)低碳铁素体钢, 如无间隙原子钢 (IF 钢)、LYP100 钢等因具有优良的延展性和较高的耗能而通常用于制造钢阻尼器^[1-2]。在工作过程中, 钢阻尼器需要承受循环载荷, 这就对其材料的抗

收稿日期: 2022-03-31; 修订日期: 2023-04-27

基金项目: 上海市中央引导地方科技发展资金资助项目

(YDZX20213100003222)

作者简介: 魏晨羲 (1996—), 男, 安徽亳州人, 硕士研究生

导师: 杨旗正高级工程师

疲劳性能提出了很高的要求。细化晶粒可以有效提高材料的疲劳寿命,从而延长钢阻尼器的使用寿命^[3-5]。MUNOZ 等^[6]通过等通道转角挤压(ECAP)将 ARMCO 铁(碳质量分数 0.01%)的平均晶粒尺寸由 72 μm 减小至 0.37 μm ,疲劳极限由 274 MPa 显著提升至 717 MPa。KOBAYASHI 等^[7]研究了平均晶粒尺寸分别为 1.4, 38 μm 的 SUS430 铁素体不锈钢(碳质量分数不高于 0.12%)的高周疲劳行为,结果表明晶粒尺寸越小,疲劳极限越高,给定应力幅下的高周疲劳寿命越长。ROLIM LOPES 等^[8]对平均晶粒尺寸分别为 19, 220 μm 的低碳铁素体钢(碳质量分数 0.04%)进行研究,发现晶粒细化使得应力分布更为均匀,有利于提高材料的低周疲劳寿命。SAWAI 等^[9]将碳质量分数为 0.05% 的低碳钢的平均晶粒尺寸由 15 μm 细化至 0.7 μm ,发现在相同动态应变条件下的低周疲劳性能未发生明显变化。综上可知,细化晶粒可以有效提高铁素体钢的高周疲劳寿命,但在是否能改善低周疲劳性能,特别是改善超低碳铁素体钢的低周疲劳性能方面尚未有统一的答案。

此外,许多研究^[10-12]还发现,在疲劳变形过程中的显微组织演变可以有效影响材料的疲劳力学行为以及裂纹的萌生和扩展行为。SHIH 等^[13-15]对平均晶粒尺寸为 80 μm 的 IF 钢的研究表明:在 0.125% 应变幅下循环加载时,试样未表现出明显的循环变形硬化,组织中出现不同尺寸的位错胞,晶界(包括三叉晶界)附近的位错胞直径小于 2 μm ,裂纹优先于此处扩展;在 0.200% 应变幅下循环加载时,

试样表现出初始硬化和二次硬化行为,晶粒内部均匀分布着直径在 2 μm 以下的位错胞,晶间及晶内均可成为裂纹优先扩展路径。

目前,(超)低碳铁素体钢在不同应变幅下的疲劳力学行为及显微组织演变等相关研究较为充分,而高应变幅下晶粒尺寸对低周疲劳行为及显微组织演变影响的相关研究相对较少。对于钢阻尼器,较大应变幅下的低周疲劳性能研究也十分重要。为此,作者采用热处理方法制备出 2 种晶粒尺寸的 IF 钢,并进行了给定周次大应变幅低周疲劳试验,研究了晶粒尺寸对 IF 钢低周疲劳行为及疲劳过程中显微组织演变的影响规律,拟为今后钢阻尼器用(超)低碳铁素体钢的组织调控提供参考。

1 试样制备与试验方法

试验材料为市售热轧 IF 钢板,厚度为 10 mm,平均晶粒尺寸约为 36 μm ,化学成分(质量分数/%)为 0.001C, 0.14Mn, 0.016P, 0.006S, 0.048Ti, 0.036Al, 余 Fe。对 IF 钢板分别进行 850 $^{\circ}\text{C} \times 1\text{ h}$ 和 950 $^{\circ}\text{C} \times 1\text{ h}$ 退火处理。在退火态 IF 钢板上取金相试样,经机械研磨抛光后,采用 0.03 μm 二氧化硅悬浮液抛光 10 min,以保证试样表面加工层被完全去除,在 Zeiss Axio Imager M2m 型光学显微镜上观察显微组织。由图 1 可知,不同温度退火后 IF 钢中的晶粒均呈等轴状,说明均已完全退火。采用截距法测得 850 $^{\circ}\text{C}$ 和 950 $^{\circ}\text{C}$ 退火后 IF 钢的平均晶粒尺寸分别约为 40, 210 μm ,分别简称为细晶试验钢和粗晶试验钢。

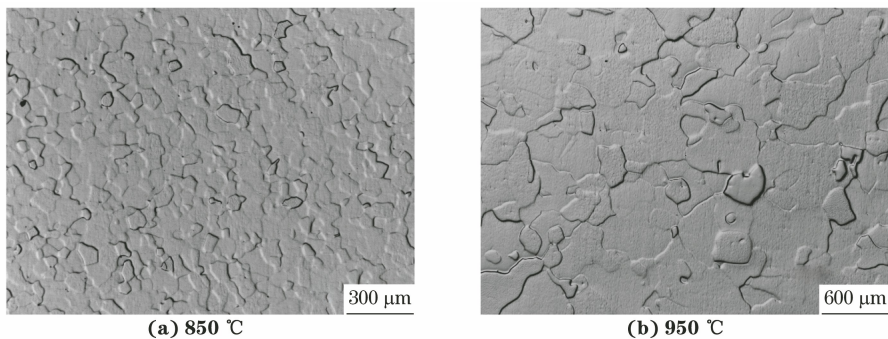


图 1 不同温度退火后 IF 钢的显微组织

Fig.1 Microstructures of IF steel after annealing at different temperatures

在细晶和粗晶试验钢上截取尺寸如图 2 所示的低周疲劳试样,试样的轴向平行于轧制方向(RD),经机械研磨后在 6% 高氯酸+94% 冰醋酸溶液(均为体积分数)中进行电解抛光,除去表面加工层,保证表面粗糙度不大于 0.2 μm 。按照 GB/T 15248—

2008,使用 MTS 370.10 型伺服液压测试系统进行室温低周疲劳试验,循环次数为 400 周次,应变幅为 1%,应变比为 -1,频率为 0.1 Hz,三角波。定义循环疲劳过程中拉伸峰值应力和压缩峰值应力的平均值为平均峰值应力,第 i 周次与第 1 周次循环平均

峰值应力之差与第1周次循环平均峰值应力的比值为加工硬化程度。

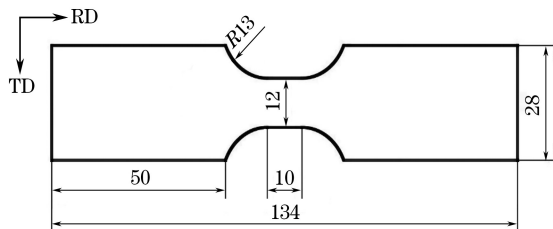


图2 低周疲劳试样的形状与尺寸

Fig.2 Shape and size of low cycle fatigue specimen

在低周疲劳试验后的试样工作段中心取样,采用 Shimadzu XRD-7000 型 X 射线衍射仪(XRD)获得试样的衍射峰,采用铜靶 K_{α} 射线,工作电压为 40 kV,工作电流为 40 mA,其中:(110),(200),(211)晶面衍射峰的扫描范围分别为 $43.5^{\circ} \sim 46.0^{\circ}$, $64.0^{\circ} \sim 66.5^{\circ}$, $81.0^{\circ} \sim 84.0^{\circ}$,步长为 0.005° ; (220),(310),(222)晶面衍射峰的扫描范围分别为 $97.0^{\circ} \sim 101.0^{\circ}$, $114.5^{\circ} \sim 118.5^{\circ}$, $135.5^{\circ} \sim 139.5^{\circ}$,步长为 0.01° 。利用修正的 Williamson-Hall 和 Warren-Averbach 方程计算位错密度^[16-19],公式如下:

$$\frac{X(L)}{L^2} = \rho \frac{\pi b^2}{2} (\ln R_e - \ln L) \quad (1)$$

式中: $X(L)$ 为修正的 Williamson-Hall 和 Warren-Averbach 方程中一阶项的系数; L 为傅里叶长度; ρ 为位错密度; b 为柏氏矢量; R_e 为位错有效外截半径。

通过修正的 Williamson-Hall 和 Warren-Averbach 方程可得到 $X(L)$, 计算推导时所用的材料本征半高宽为测量半高宽与仪器展宽之差,其中测量半高宽通过采用 Lorentzian 函数对去除 $K_{\alpha 2}$ 线的衍射峰进行拟合得到,仪器展宽由 LaB_6 标准粉末样品求得。通过式(1)拟合 $X(L)/L^2$ 与 $\ln L$, 得到曲线斜率,即可求得位错密度。

在低周疲劳试验后的试样工作段中心取样,使用 Tescan Mira 3 XH 型场发射扫描电子显微镜(SEM),利用电子通道衬度成像(ECCD)和电子背散射衍射(EBSD)成像观察显微组织。对于细晶试验钢试样,EBSD 的扫描范围为 $60 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$,步长为 100 nm ;对于粗晶试验钢试样,EBSD 的扫描范围为 $200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,步长为 250 nm 。使用 AZtec flex 软件进行数据后处理,进行取向成像显微分析(OIM)和局部平均取向差(KAM)分析。

2 试验结果与讨论

2.1 疲劳后的显微组织

由图3可见,疲劳试验后细晶试验钢的显微组织主要由位错胞组成,晶内分布的位错胞直径约为 $1.3 \mu\text{m}$,多数位错胞尺寸相近且分布较均匀,部分位错胞之间存在较大的取向差。

由图4可见:疲劳试验后粗晶试验钢的显微组织主要由宏观驻留滑移带(Macro-PSB)^[20]和位错胞

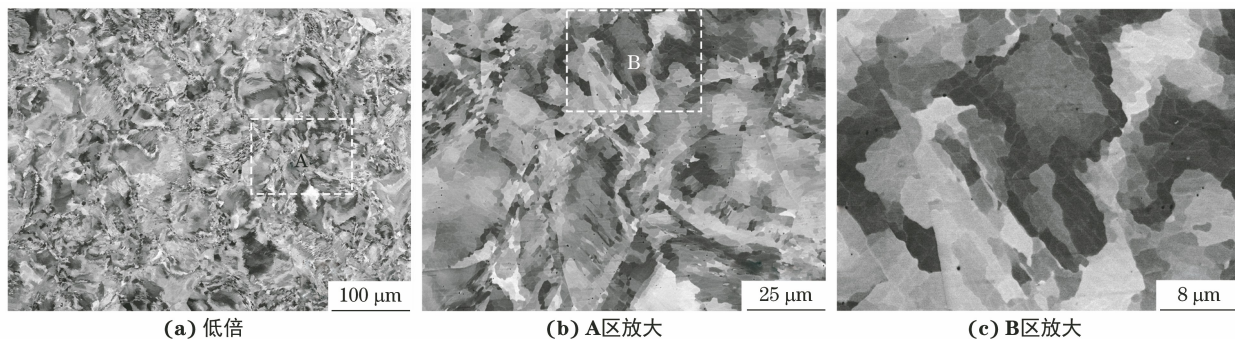


图3 低周疲劳试验后细晶试验钢的显微组织

Fig.3 Microstructure of fine-grained test steel after low cycle fatigue test: (a) at low magnification; (b) enlargement of area A and (c) enlargement of area B

组成,其中A区为位错胞,B区为Macro-PSB,位错胞平均直径约为 $1.2 \mu\text{m}$;Macro-PSB 内部包含阶梯状结构的驻留滑移带(PSB,黑色箭头)和不同尺寸的位错胞,其中较大的位错胞直径约为 $1.2 \mu\text{m}$,较小的位错胞直径约为 $0.5 \mu\text{m}$ (白色圆圈)。

由于细晶试验钢的晶界影响区范围较大,为了协调晶粒间变形容易同时开动多个滑移系^[21],形成

位错缠结,因此其疲劳变形组织主要由位错胞组成。而粗晶试验钢的晶界影响区相对较小,晶粒内部应力状态相对接近单晶,因此其疲劳变形组织由Macro-PSB和位错胞混合组成。

由图5可见:细晶试验钢的晶粒内部主要由位错胞构成,晶粒内部取向差相对较小,仅少部分位错胞之间存在较大的取向差;粗晶试验钢的晶粒内

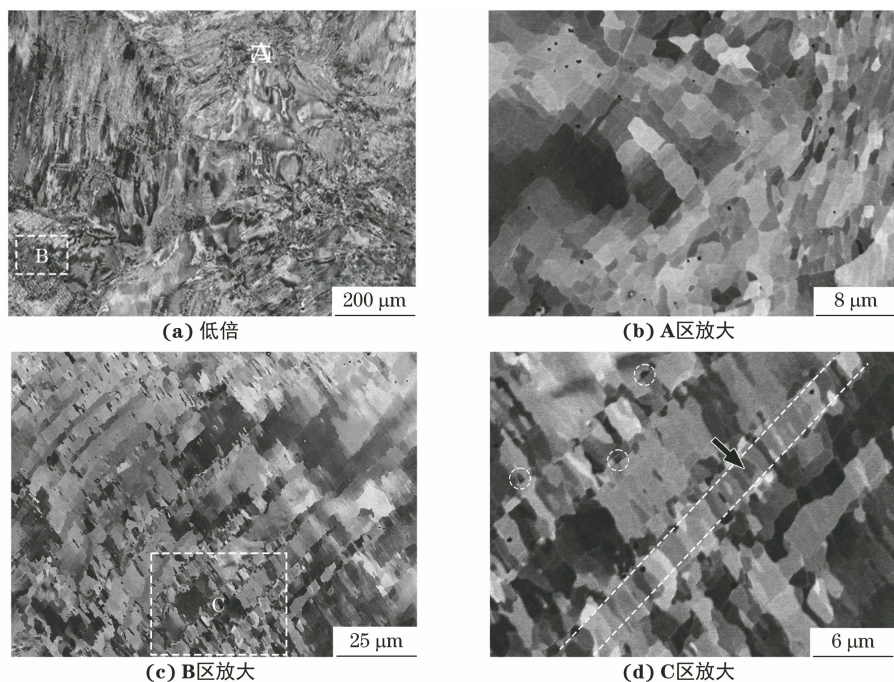


图4 低周疲劳试验后粗晶试验钢的显微组织

Fig.4 Microstructure of coarse-grained test steel after low cycle fatigue test: (a) at low magnification; (b) enlargement of area A; (c) enlargement of area B and (d) enlargement of area C

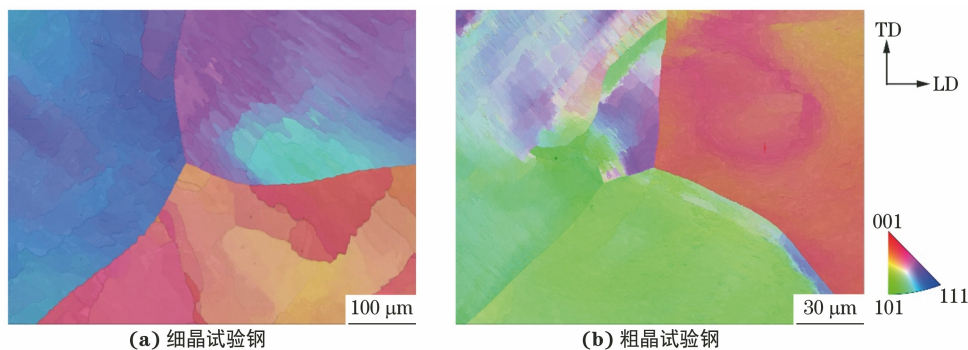


图5 细晶和粗晶试验钢的OIM图和反极图

Fig.5 OIM map and inverse pole figure of fine-grained (a) and coarse-grained (b) test steel

部主要由 Macro-PSB 和位错胞混合组成, Macro-PSB 及其周围区域取向差较大, 此外部分晶界附近也存在较大取向差。

对图5进行局部取向差分析, 结果如图6所示。由图6可见: 细晶试验钢中 KAM 主要集中于位错胞壁处, 整体分布较为均匀; 粗晶试验钢中的 KAM 分布相对不均匀, 主要集中在包含 Macro-PSB 的晶粒中(粗箭头), 以及部分晶界(细箭头)附近。细晶和粗晶试验钢的 KAM 平均值分别为 0.22° , 0.35° , 可见粗晶试验钢的 KAM 相对更高。

由图7可以确定, 低周疲劳试验后细晶和粗晶试验钢的位错密度 ρ 分别为 7.73×10^{13} , $1.50 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$; 粗晶试验钢的位错密度高于细晶试验钢。

以往研究表明, 位错密度和位错胞尺寸具有相关性。然而, 细晶试验钢和粗晶试验钢的位错胞平均尺寸差异较小, 因此可以认为位错胞不是二者位错密度差异的主要原因。除位错胞外, 粗晶试验钢疲劳变形组织中还包含 Macro-PSB, 其内部及周围区域具有明显的取向差和局部平均取向差集中, 表明具有较大的变形集中; 该变形集中由位错堆积引起。因此, 可以认为 Macro-PSB 是粗晶试验钢位错密度大于细晶试验钢的原因之一。此外, 粗晶试验钢部分晶界周围也有较为明显的变形集中, 同样也是其位错密度较大的原因之一。

2.2 低周疲劳行为

由图8可见: 细晶和粗晶试验钢的滞回曲线均

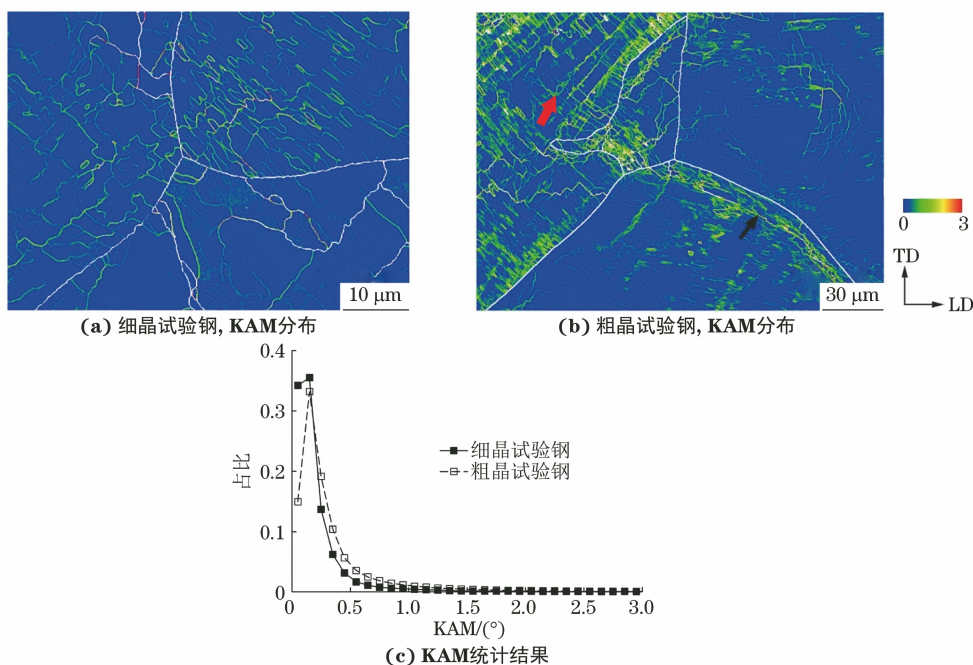
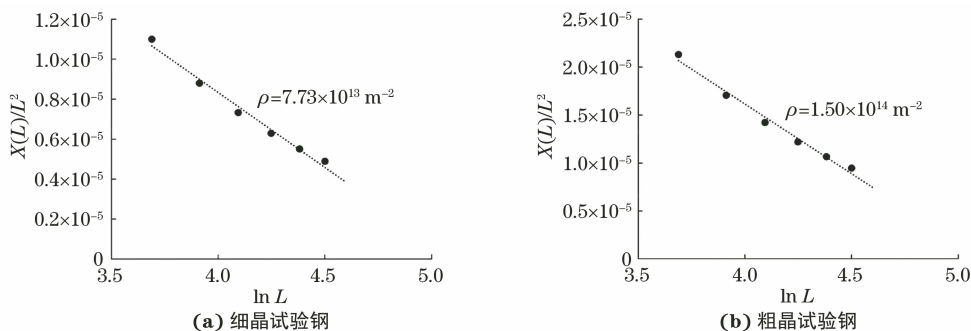


图6 细晶和粗晶试验钢的KAM分布和KAM统计结果

Fig.6 KAM map (a—b) and KAM statistical results (c) of fine-grained (a) and coarse-grained (b) test steel

图7 细晶和粗晶试验钢的 $X(L)/L^2$ 与 $\ln L$ 拟合曲线Fig.7 Fitting curves of $X(L)/L^2$ - $\ln L$ of fine-grained (a) and coarse-grained (b) test steel

较为饱满。在初始10周次循环中,细晶和粗晶试验钢的平均峰值应力均有明显增加,在第11周次至第400周次范围内,峰值应力增加较为缓慢;相较于粗晶试验钢,细晶试验钢具有更高的初始峰值应力,但在循环第11至第400周次时二者的平均峰值应力相当。细晶和粗晶试验钢在初始10周次循环的加工硬化程度均增加显著,但细晶试验钢在第11至第400周次的加工硬化程度缓慢增加,而粗晶试验钢在第11至第100周次循环的加工硬化程度基本保持不变,在第101至第400周次则表现出相对显著的二次硬化行为。2种晶粒尺寸的试验钢在疲劳变形过程中均未表现出循环变形软化行为。

前10周次循环内,晶界对位错滑移的阻碍作用使得晶界密度更高的细晶试验钢具有相对更高的平均峰值应力。在第11周次至第400周次循环中,细

晶和粗晶试验钢的平均峰值应力水平相当,表明产生的大量位错开始形成位错胞,有效阻碍了位错滑移^[22-23]。循环变形过程中位错形成特定结构排列(例如PSB)会使滑移阻碍减小,使材料出现循环饱和/循环软化力学行为^[24-25],这也是粗晶试验钢具有相对显著的循环饱和阶段的原因。随着循环变形的增加,Macro-PSB中细小位错胞的形成进一步阻碍了位错运动,这可能是粗晶试验钢具有相对显著的二次循环硬化的原因之一。

3 结论

(1) 通过850,950℃退火热处理,得到平均晶粒尺寸分别为40,210 μm的细晶和粗晶试验钢。在疲劳循环过程中,细晶试验钢的初始平均峰值应力高于粗晶试验钢,随着循环次数增加,2种晶粒尺寸试验

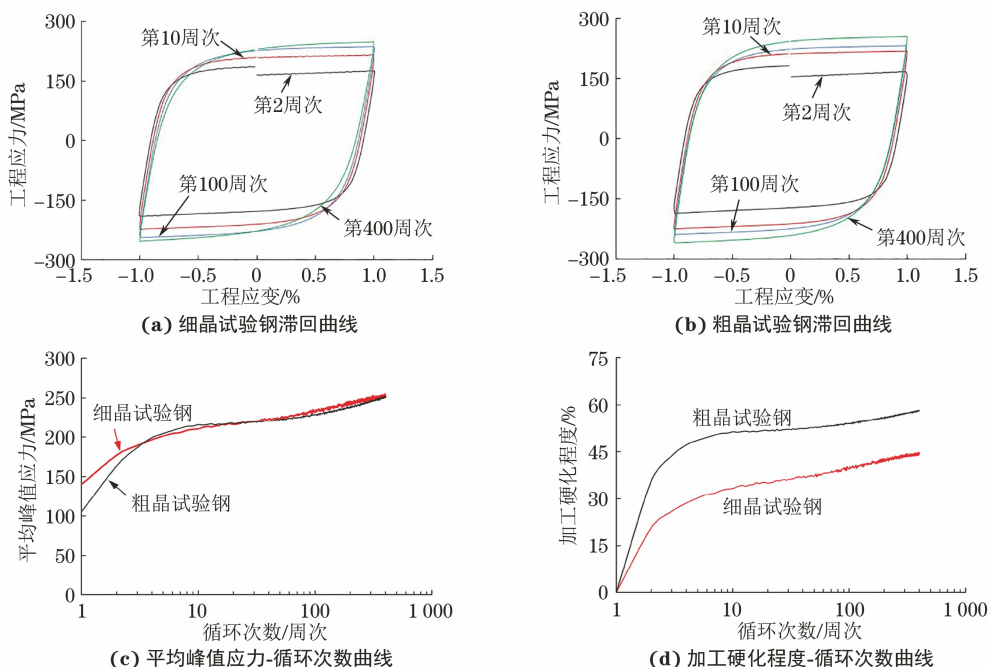


图8 细晶和粗晶试验钢的低周疲劳行为

Fig.8 Low cycle fatigue behavior of fine-grained and coarse-grained test steel: (a) hysteresis loop of fine-grained test steel; (b) hysteresis loop of coarse-grained test steel; (c) average peak stress-cycle number curves and (d) work hardening degree-cycle number curves

钢的平均峰值应力趋于相近;细晶试验钢始终表现为循环加工硬化,粗晶试验钢表现为初始循环硬化、循环饱和和二次循环硬化。

(2) 经 400 周次疲劳循环后,细晶试验钢的显微组织由尺寸相近且分布均匀的位错胞组成,粗晶试验钢的显微组织主要由宏观驻留滑移带和位错胞组成,宏观驻留滑移带中包含较为细小的位错胞。粗晶试验钢具有较高的位错密度及相对显著的组织不均匀性。

参考文献:

- [1] 宋凤明,温东辉,李自刚,等.低屈服点钢的发展及应用[J].热加工工艺,2008,37(6):85-88.
SONG F M, WEN D H, LI Z G, et al. Application and development of low yield point steel [J]. Hot Working Technology, 2008, 37(6): 85-88.
- [2] SAEKI E, SUGISAWA M, YAMAGUCHI T, et al. Mechanical properties of low yield point steels[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1998, 10(3): 143-152.
- [3] THOMPSON A W, BACKOFEN W A. The effect of grain size on fatigue[J]. Acta Metallurgica, 1971, 19(7): 597-606.
- [4] HANLON T, KWON Y N, SURESH S. Grain size effects on the fatigue response of nanocrystalline metals [J]. Scripta Materialia, 2003, 49(7): 675-680.
- [5] LAWSON L, CHEN E Y, MESHII M. Near-threshold fatigue: A review[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21: 15-34.
- [6] MUÑOZ J A, HIGUERA O F, CABRERA J M. High cycle

fatigue of ARMCO iron severely deformed by ECAP [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 681: 85-96.

- [7] KOBAYASHI S, YANG W T, TOMOBE Y, et al. Low-angle boundary engineering for improving high-cycle fatigue property of 430 ferritic stainless steel[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(22): 9273-9285.
- [8] ROLIM LOPES L C, CHARLIER J. Effect of grain size and intergranular stresses on the cyclic behaviour of a ferritic steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 1993, 169(1/2): 67-77.
- [9] SAWAI T, MATSUOKA S, TSUZAKI K. Low- and high-cycle fatigue properties of ultrafine-grained low carbon steels [J]. Tetsu-to-Hagane, 2003, 89(6): 726-733.
- [10] MAGNIN T, RAMADE C, LEPINOUX J, et al. Low-cycle fatigue damage mechanisms of F.c.c. and B.c.c. polycrystals: Homologous behaviour? [J]. Materials Science and Engineering: A, 1989, 118: 41-51.
- [11] SANGID M D. The physics of fatigue crack initiation[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 57: 58-72.
- [12] STANZL-TSCHEGG S, SCHÖNBAUER B. Near-threshold fatigue crack propagation and internal cracks in steel[J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 1547-1555.
- [13] SHIH C C, HO N J, HUANG H L. Dislocation evolution in interstitial-free steel during fatigue near the endurance limit [J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(3): 818-823.
- [14] SHIH C C, HO N J, HUANG H L. The study of fatigue behaviors and dislocation structures in interstitial-free steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41(8): 1995-2001.

(下转第 38 页)

- 实验力学, 2005, 20(2): 241-247.
- ZHU Y G. A research for thin metal sheet fatigue test under tension-compression loading [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(2): 241-247.
- [6] 陈云霞, 杨旋, 李创. 车身薄板疲劳试验装置及测试方法: 102735557A[P]. 2012-10-17.
- CHEN Y, YANG X, LI C. Fatigue test device for vehicle body thin plate, and test method thereof: 102735557A[P]. 2012-10-17.
- [7] CAO J A, LEE W, CHENG H S, et al. Experimental and numerical investigation of combined isotropic-kinematic hardening behavior of sheet metals[J]. International Journal of Plasticity, 2009, 25(5): 942-972.
- [8] TONG C, WU J, HUA K, et al. Low-cycle fatigue life evaluation of buckling-restrained braces based on cumulative plastic deformation curves [J]. Advances in Structural Engineering, 2022, 25(2): 336-354.
- [9] 苏少普, 常文魁, 陈先民. 飞机典型壁板结构剪切屈曲疲劳试验与分析方法[J]. 航空学报, 2022, 43(5): 225219.
- SU S P, CHANG W K, CHEN X M. Fatigue buckling test and analytical approach of aircraft typical panel structures[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(5): 225219.
- [10] 苏洪英, 刘仁东, 芦延鹏, 等. 汽车薄板拉-压高周疲劳试样的形状和尺寸选取[J]. 理化检验(物理分册), 2021, 57(10): 27-31.
- SU H Y, LIU R D, LU Y P, et al. Shape and size selection of tension-compression high cycle fatigue specimens for automobile sheet[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2021, 57(10): 27-31.
- [11] HU Y N, WU S C, WITHERS P J, et al. The effect of manufacturing defects on the fatigue life of selective laser melted Ti-6Al-4V structures[J]. Materials & Design, 2020, 192: 108708.
- [12] PRASHANTH NAIK R, SAMATHAM M, PATANGAY V K, et al. Experimental study on the effect of annealing on fatigue life of SS 304 steels [J]. International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology, 2020: 164-169.
- [13] 机械工业理化检验人员技术培训和资格鉴定委员会. 力学性能试验[M]. 北京: 中国计量出版社, 2008.
- Technical Training and Qualification Appraisal Committee for Physical and Chemical Inspection Personnel in Mechanical Industry. Mechanical property test [M]. China Metrology Press, 2008.
- [14] 陶美娟. 材料质量检测与分析技术[M]. 北京: 中国质检出版社, 2018.
- TAO M J. Material quality detection and analysis technology [M]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2018.
- [15] 刘冬, 薛欢, 杜丽影, 等. 冷轧薄板低周疲劳试验抗屈曲装置: 205749099U[P]. 2016-11-30.
- LIU D, XUE H, DU L Y, et al. Flat cold rolled sheet hangs down anti bucking device of all fatigue test: 205749099U[P]. 2016-11-30.
- [16] DIETRICH L, SOCHA G, KOWALEWSKI Z L. Anti-buckling fixture for large deformation tension-compression cyclic loading of thin metal sheets[J]. Strain, 2014, 50(2): 174-183.
- [17] KOWALEWSKI Z L, DIETRICH L, SOCHA G. Experimental investigation of thin brass sheets under tension-compression cyclic loading [J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015(3): 757-757.
- (上接第 28 页)
- [15] SHIH C C, YEH D H, HO N J, et al. The study of crack-propagation behaviors and dislocation structures in cyclically deformed polycrystalline IF steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(21): 6381-6386.
- [16] KUMAGAI M, YOKOYAMA R. Characterization of microstructures by X-ray diffraction line profile analysis[J]. Journal of the Society of Materials Science, Japan, 2020, 69(3): 277-283.
- [17] TAKEBAYASHI S, KUNIEDA T, YOSHINAGA N, et al. Comparison of the dislocation density in martensitic steels evaluated by some X-ray diffraction methods [J]. ISI International, 2010, 50(6): 875-882.
- [18] MASUMURA T, URANAKA S, MATSUDA K, et al. Analysis of dislocation density by direct-fitting/modified Williamson-Hall (DF/mWH) method in tempered low-carbon martensitic steel [J]. Tetsu-to-Hagane, 2020, 106(11): 826-834.
- [19] SHINTANI T, MURATA Y. Evaluation of the dislocation density and dislocation character in cold rolled Type 304 steel determined by profile analysis of X-ray diffraction[J]. Acta Materialia, 2011, 59(11): 4314-4322.
- [20] POLÁK J, DEGALLAIX S, DEGALLAIX G. The role of cyclic slip localization in fatigue damage of materials[J]. Le Journal De Physique IV, 1993, 3: 679-684.
- [21] JOHNSTON T L, FELTNER C E. Grain size effects in the strain hardening of polycrystals [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1970, 1(5): 1161-1167.
- [22] GREULICH F, MURR L E. Effect of grain size, dislocation cell size and deformation twin spacing on the residual strengthening of shock-loaded nickel [J]. Materials Science and Engineering, 1979, 39(1): 81-93.
- [23] CUDDY J, NABIL BASSIM M. Study of dislocation cell structures from uniaxial deformation of AISI 4340 steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 1989, 113: 421-429.
- [24] DODARAN M, KHONSARI M M, SHAO S. Critical operating stress of persistent slip bands in Cu [J]. Computational Materials Science, 2019, 165: 114-120.
- [25] KRUMML T, POLÁK J. Fatigue softening of X10CrAl24 ferritic steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 319/320/321: 564-568.