

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2012.05.016

调质态 40Cr 钢旋转弯曲疲劳寿命与显微组织的关系^{*}

吴益文¹, 汪宏斌², 华 沂¹, 王迎春^{1,2}, 徐凌云¹, 吉 静¹, 任 晨^{1,2}

(1. 上海出入境检验检疫局 国家再制造机械产品检测实验室 上海 200135; 2. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072)

摘 要: 文中对调质态的 40Cr 钢进行了旋转弯曲疲劳试验, 采用透射电镜对经过不同的旋转弯曲疲劳试验阶段的试样进行微观分析, 并测定了不同疲劳阶段试样内部的位错密度。结果表明: 开始时位错从晶界萌生, 向晶内扩展, 形成亚晶粒组织。随着旋转弯曲疲劳循环次数增加, 位错密度逐渐增加, 晶内碳化物也发生明显变形以至破裂。建立位错密度与旋转弯曲疲劳之间的数学方程式, 旋转弯曲疲劳所引起的位错密度增殖与疲劳循环次数呈线性正比关系, 函数公式为 $\rho = 2.0108 \times 10^8 N - 1.914 \times 10^8$, $R^2 = 0.98193$ 。研究结果可供无损检测法制订再制造毛坯剩余寿命判据参考。

关键词: 再制造坯件; 40Cr 钢; 显微组织; 位错密度; 疲劳寿命

中图分类号: TG115.57; TH17 文献标识码: A 文章编号: 1007-9289(2012)05-0090-06

Rotate Bending Fatigue Life and Microstructure of Quenched and Tempered 40Cr steel

WU Yi-wen¹, WANG Hong-bin², HUA Yi¹, WANG Ying-chun^{1,2}, XU Ling-yun¹, JI Jing¹, REN Chen^{1,2}

(1. National Manufacturing Machinery Products Inspection Lab, Shanghai Entry-Exit Inspection & Quarantine Bureau, Shanghai 200135; 2. College of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072)

Abstract: The rotating bending fatigue testing was carried out on the quenched and tempered 40Cr, and microstructure and the inner dislocation density during different rotating bending fatigue states were analyzed by transmission electron microscopy (TEM). The results shows that dislocations in the quenched and tempered 40Cr initiate from the grain boundaries extending into the grain, and the subgrains form. With the increasing number of cycles for rotary bending fatigue, the carbide begins to deform measurably and is destroyed into micro-cracks. A mathematical model is set up to describe the relationship between dislocation density and rotary bending fatigue times. The density of the increasing dislocations caused by rotating bending fatigue has a linear relationship with the fatigue cycle number. The function formula is $\rho = 2.0108 \times 10^8 N - 1.914 \times 10^8$, $R^2 = 0.98193$. The above findings may be used as criteria references for non-destructive testing on the remaining life of remanufacturing blanks.

Key words: remanufacturing blank; 40Cr steel; microstructure; dislocation density; fatigue life

0 引 言

曲轴工作过程中, 往复的惯性力和离心力使之承受很大的弯曲和扭转应力, 轴颈表面容易磨损。疲劳断裂是曲轴的主要破坏形式, 裂纹源多

发生在轴颈与曲臂的过渡圆角处, 统计表明, 曲轴疲劳损坏的主要原因是旋转弯曲疲劳所引起的^[1]。目前对材料疲劳过程的研究大多是在疲劳裂纹萌生之后展开^[2], 但是在实际使用过程

收稿日期: 2012-06-26; 修回日期: 2012-09-13; 基金项目: * 国家质检总局 2011 年科研项目(2011IK043)

作者简介: 吴益文(1967-), 男(汉), 上海人, 高级工程师, 硕士; 研究方向: 再制造产品检测技术

网络出版日期: 2012-09-18 20:41; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120918.2041.002.html>

引文格式: 吴益文, 汪宏斌, 华沂, 等. 调质态 40Cr 钢旋转弯曲疲劳寿命与显微组织的关系 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(5): 90-95.

中,零件内部产生微裂纹时,一般已达到该零件整个使用寿命的中后期,而针对结构钢材料早期疲劳的研究就更少。

试验以常用曲轴材料结构钢 40Cr 为对象,研究了在疲劳初期,随着疲劳循环次数的增加材料内部微观组织的演变特征,用割线法来测量试样的位错密度,观察碳化物的变化,以期能为再制造坏件的检验鉴别作一些基础性研究。

1 试验方法

试验用材料为曲轴常用的 40Cr 钢,化学成分见表 1。疲劳试验用 40Cr 钢试样为调质态,热处理工艺为:淬火温度为 $(860 \pm 10)^\circ\text{C}$,油淬, $(560 \pm 10)^\circ\text{C}$,回火,油冷。调质态 40Cr 钢的力学性能如表 2 所示。

试验所用的旋转疲劳试验机为 HT-8120 小野式旋转弯曲疲劳试验机,转速为 3 000 r/min。疲劳试样的尺寸如图 1 所示,根据 GB4337-2008 《金属旋转弯曲疲劳试验方法》的规定,试验在室温下进行 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,试验机转速为 3 000 r/min,对称应力循环 $(R = -1)$,加载应力为 422 MPa。

表 1 调质 40Cr 钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of quenched and tempered 40Cr steel

Element	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
$w/\%$	0.43	0.69	0.27	0.008	0.017	0.99	0.055

表 2 调质 40Cr 钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of quenched and tempered 40Cr steel

$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_M/MPa	Elongation $\delta/\%$	Contraction $A/\%$
787	925	16.7	55.5

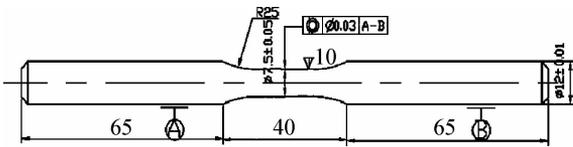


图 1 旋转弯曲疲劳试样尺寸图^[3](单位:毫米)

Fig. 1 Sample of rotate bending fatigue^[3](Unit: mm)

试验中所用的透射电镜型号为 FEI TECNAI G² S-TWIN 场发射透射电子显微镜。采用

TEM 分别观察了原始态试样、10 万次疲劳、100 万次疲劳、500 万次疲劳及 1 000 万次旋转弯曲疲劳后的试样的微观组织。

对经过不同疲劳阶段的试样的位错密度进行了测量,每个试样取 5 个视场,测量位错密度采用割线法。首先用 MIAPS 软件在透射电镜照片上自动画出由 5 条纵线和 5 条横线组成的网格线,并利用每张图上的标尺测出纵线和横线的长度 $(0.7087 \mu\text{m})$,如图 2 所示。再数出每根网格线与位错的相交的节点数。位错密度的计算公式为^[8-9]:

$$\rho = \frac{1}{t} \left(\frac{\sum n_v}{\sum L_v} + \frac{\sum n_h}{\sum L_h} \right) \quad (1)$$

式中: ρ 为位错密度/ m^2 ; n_v 为位错与纵线相交的节点数; n_h 为位错与横线相交的节点数; L_v 为纵线的长度; L_h 为横线的长度; t 为透镜薄膜的厚度^[4]。

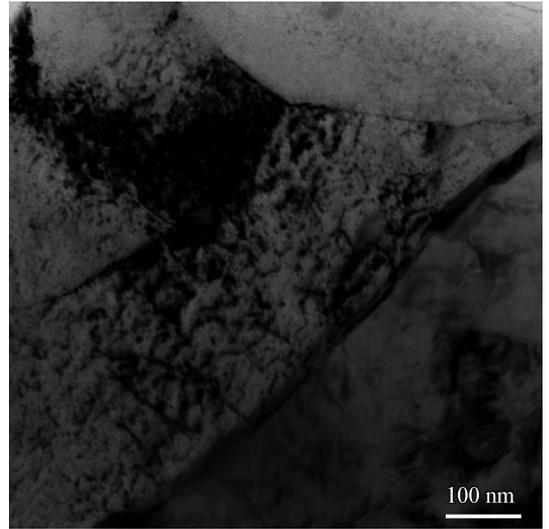


图 2 调质态 40Cr 钢的 TEM 图

Fig. 2 TEM morphology of quenched and tempered 40Cr steel

2 试验结果与讨论

2.1 疲劳试样显微组织

从图 3 中可以看到,原始态的显微组织中位错很少或几乎没有,经淬火和高温回火的 40Cr 钢基本上保留了板条马氏体的形貌,沿板条界或在板条中较密的分布着粒状碳化物。

从图 4 可以看到,经过 10 万次疲劳后,由于

应力水平较高,在试样内部产生应力集中,使得大量位错萌生,位错产生堆积,无序的位错缠结连成网状,网状位错分布密集,位错已向晶内扩展。

疲劳次数增加到 100 万次时,如图 5 所示,胞状位错结构已经演变为亚晶粒,40Cr 钢淬火后基体中含有较高的合金元素铬及过饱和的碳,这种不稳定的结构在回火时将获得相变驱动力,通过原子扩散发生脱溶沉淀,位错通过空位扩散重新

排列,析出的大量碳化物对缠结位错有强烈的钉扎作用,阻碍位错运动,碳化物未发生变形。

经过 500 万次疲劳后,如图 6 所示,试样内部产生大量疲劳滑移带,由于循环次数较多,加载应力较大,碳化物在切应力的作用下发生变形。

从图 7 中看到,疲劳次数达到 1 000 万次时,碳化物变形已经比较明显,并且由于亚晶界处大量位错的塞积缠结,基体被破坏,产生了微观的疲劳微裂纹。

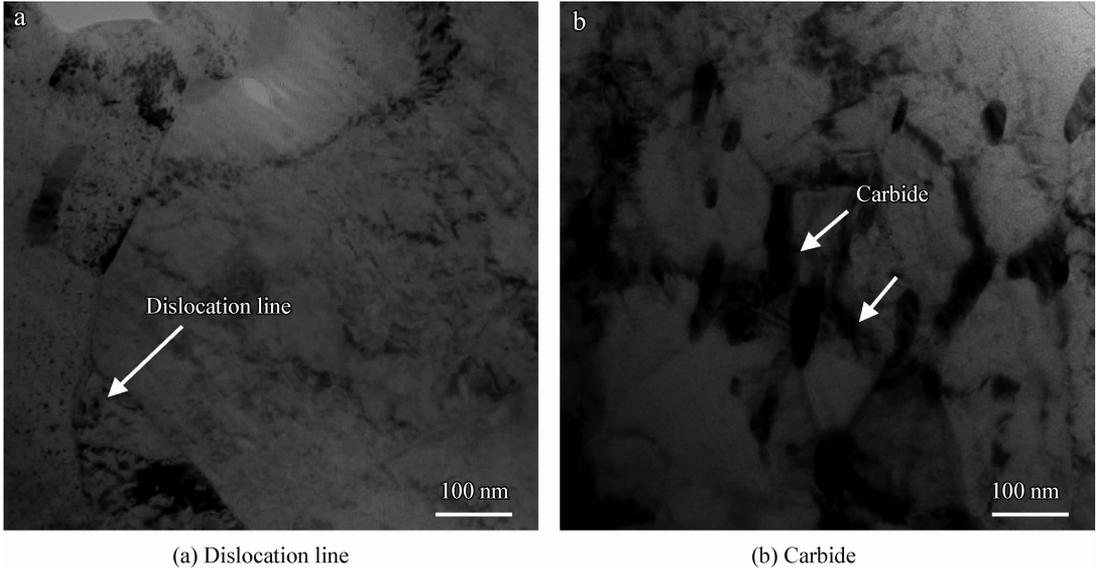
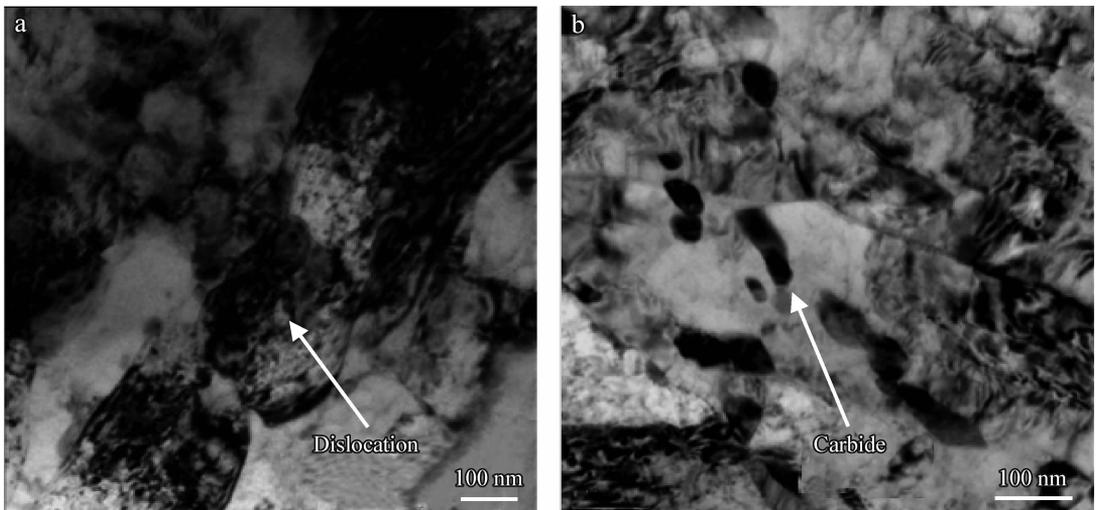


图 3 调质态 40Cr 钢原始态组织

Fig. 3 Original microstructure of quenched and tempered 40Cr steel

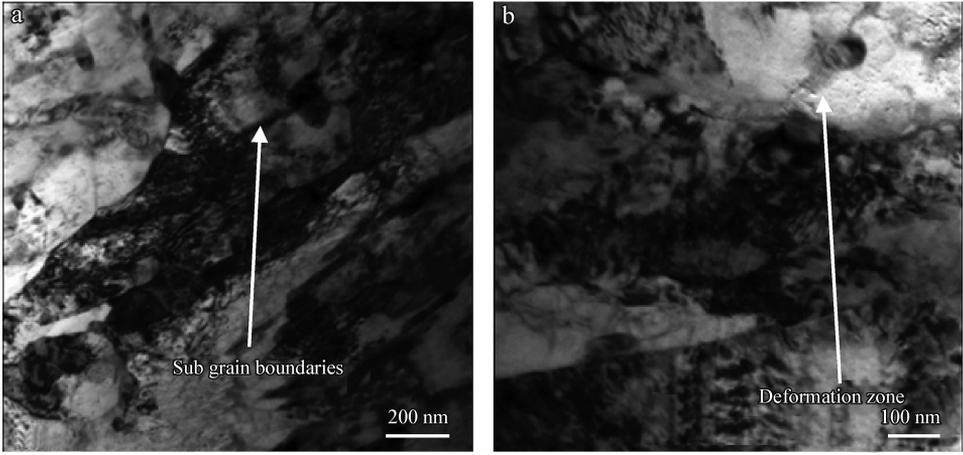


(a) Dislocation extend in to grain

(b) Carbide

图 4 经过 10 万次疲劳后调质态 40Cr 钢的微观组织

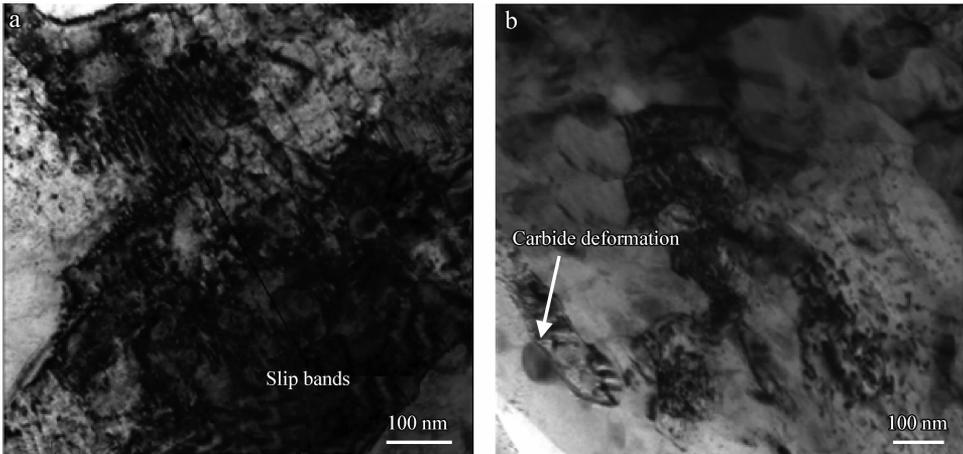
Fig. 4 Microstructure of quenched and tempered 40Cr steel after 100,000 fatigue cycles



(a) Sub grain boundaries transferred from dislocations (b) Deformation zone between the carbide and ferrite

图 5 经过 100 万次疲劳后调质态 40Cr 钢的微观组织

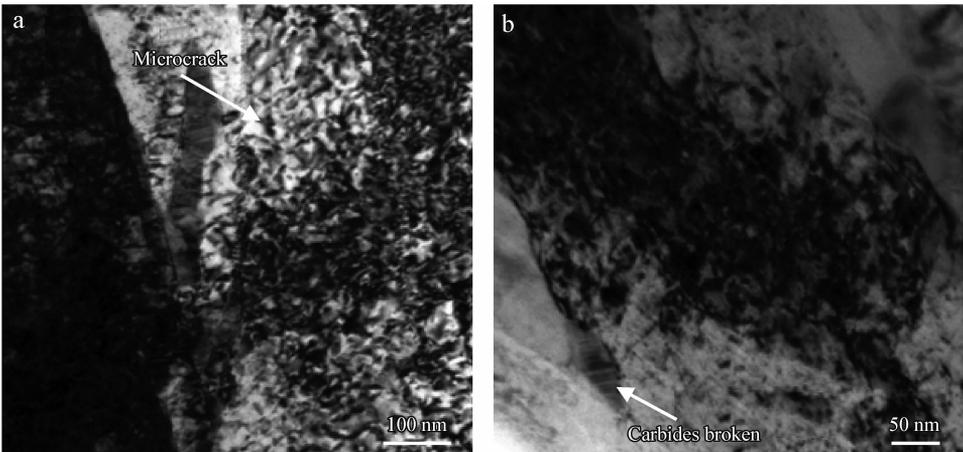
Fig. 5 Microstructure of quenched and tempered 40Cr steel after 1,000,000 fatigue cycles



(a) Slip bands with a large amount of dislocation (b) Carbide deformation

图 6 经过 500 万次疲劳后调质态 40Cr 钢的微观组织

Fig. 6 Microstructure of quenched and tempered 40Cr steel after 5,000,000 fatigue cycles



(a) Microcrack (b) Carbide broken

图 7 经过 1 000 万次疲劳后调质态 40Cr 钢的微观组织

Fig. 7 Microstructure of quenched and tempered 40Cr steel after 10,000,000 fatigue cycles

2.2 位错密度与旋转弯曲疲劳的关系

按位错密度割线测量法分别测量始态、经过10万次、100万次、500万次和1000万次疲劳这5个状态试样的位错密度,首先测量横线和纵线长度,然后数出每根网格线所经过的位错数,根据公式计算每个视场的位错密度,最后取平均值,将试样位错密度大小列于表3。

表3 位错密度的测量数据

Table 3 Dislocation density data of samples

	Dislocation density $\rho/(10^{13} \cdot \text{m}^{-2})$					
	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	Section 5	Average
Original	2.885	2.117	1.270	1.975	3.670	2.383
10^5 cycles	11.595	7.355	6.109	4.987	5.361	7.081
10^6 cycles	16.207	19.226	12.343	15.085	10.847	14.742
5×10^6 cycles	52.487	75.355	94.839	77.548	111.871	82.420
10^7 cycles	169.056	192.370	203.870	226.530	245.935	207.552

3 分析与讨论

3.1 疲劳循环次数与位错形态的关系

循环次数为10万次时,40Cr钢在循环载荷的作用下分切应力最大的滑移面上且阻力较小的位错首先开始滑移。位错运动受阻于晶界、相界或与其它滑移面上的位错相交时,形成了位错塞积群、位错缠结,增加了位错运动的阻力,造成了局部的应力集中。位错滑移到试样表面上,就会在表面上形成台阶。晶界就是一种位错源,它可以向外发射位错^[5],位错运动拉到一起形成条带。位错运动拉到一起形成条带,还有些条带是由一些相距较近的位错缠结转变而来的。

疲劳次数增加到100万次时,铁素体和碳化物之间发生变形,因为铁素体基体和碳化物的硬度相差较大,在相同载荷作用下,铁素体的变形量远大于碳化物的变形量,此外铁素体在变形的同时还要与碳化物的交界处补偿碳化物与铁素体之间变形量的差值,使得该处的铁素体的变形量比别处更大,这就造成铁素体与碳化物的交界处会产生局部的塑性变形区。

当循环次数增加到500万次时,40Cr钢位错密度高、能量高,为了降低系统的自由能,借助于外加载荷的作用,位错与位错之间或位错与点缺

根据表3的数据结果,将不同疲劳状态下试样的平均位错密度与其各自的疲劳循环次数进行拟合,得到函数公式为 $\rho = 2.0108 \times 10^8 N - 1.914 \times 10^8$,拟合的相关度 $R^2 = 0.98193$,说明该拟合直线符合旋转弯曲疲劳循环次数与位错密度的关系,因此疲劳循环次数与位错密度就成一次函数关系。

陷之间发生交互作用,导致部分位错消失,缠结中剩余的位错相互连接,排列形成条带状,条带两侧则是低位错密度区^[6]。如果近邻的条带相互连接形成封闭“环”,环上位错密度非常高,环带内为低位错密度区。位错密度高,应变能高,在外加载荷的作用下,环带上的位错重新排列组合,条带的宽度变窄,环带有规则排列,形成位错胞^[7]。

循环次数达到1000万次,位错在原有的带状形态基础上又形成了亚晶粒组织^[7]。封闭的位错条带、“胞块”状的位错结构、位错胞及亚晶共同的特点是它们都是由高密度位错组成的,只是位错排列的方式及表现出的形态不同而已^[8]。位错密度越高应变能越高,位错之间的相互作用越强,同类型的异号位错相遇消失,螺型位错的交滑移,刃形位错的攀移等改变了位错的组态,使能量降低,位错组态趋于稳定^[9]。

3.2 疲劳循环次数与位错密度的关系

位错周围点阵畸变所引起的弹性应力场导致周围晶体能量增加。若将位错线近似看成一条直线,位错线的应变能主要分布在如图8所示的管状区域内,其中位错线的长度为 l ,管的内径为 b_0 ,管外径为 r_1 ,一般取 10^{-6} 。则该位错线的应变能总量的计算公式为^[10]:

$$W = \frac{\rho b^2 l}{4\pi K} \ln \frac{r_1}{b_0} \quad (2)$$

式中: b 为伯氏矢量, K 的范围为 $1-\nu \sim 1$ (ν 为泊松比)。由式中可以看见, 位错线的长度与应变能成正比关系, 而在旋转弯曲疲劳试验过程中, 试验机对疲劳试样反复做功, 每一做功都会在试样内部增加一部分能量 W , 而这部分能量就以位错线的应变能的形式保留下来, 该应变能与疲劳循环次数成正比 N , 即 $W \propto N$, 由于应变能与位错线长度 l 成正比, 因此疲劳循环次数与位错线长度的增加量成正比, 即 $\Delta l \propto N$, 而根据位错密度的定义, 位错密度 ρ 为单位体积位错线的总长度, 即 $\rho = l/V$, $\Delta \rho = \Delta l/V$, 所以位错密度的增加量 $\Delta \rho$ 与疲劳循环次数就构成了正比关系。研究结果可供无损检测制订再制造毛坯剩余寿命判据时参考^[11]。

试验模拟了曲轴再制造坯件在不同旋转次数下的显微组织变化情况, 发现位错密度随着旋转次数的增加而增加, 旋转次数越多, 位错密度越大。在使用中, 当曲轴的旋转次数达到 500 万次时, 组织碳化物在切应力的作用下发生变形, 当疲劳次数达到 1 000 万次时, 碳化物变形已经比较明显, 基体被破坏, 产生了微观的疲劳微裂纹, 此时再制造件剩余寿命降低, 可能对车辆行驶造成安全隐患, 需要对曲轴进行替换。

4 结 论

(1) 在同一应力水平下, 随着疲劳循环次数增加, 位错从晶界出发向晶内扩展, 位错的形态由无规律的分布到形成位错条带, 最后形成亚晶粒组织。

(2) 旋转弯曲疲劳所引起的位错密度与循环次数之间呈线性关系, 拟合后函数公式为 $\rho =$

$$2.0108 \times 10^8 N - 1.914 \times 10^8, R^2 = 0.98193.$$

(3) 研究结果可供无损检测制订再制造毛坯剩余寿命判据时参考。

参考文献

- [1] Aminudin B A, Jae Eung Oh, Jung Yoon Lee. Analysis of an in-line engine crankshaft under the firing condition [J]. Journal of Automobile Engineering, 2005, 219 (3): 345-353.
- [2] 杨晓华, 兗卫真. 回火温度对 40Cr 钢疲劳裂纹扩展的影响 [J]. 机电技术, 2003, 26(9): 229-234.
- [3] GB/T4337-2008《金属材料疲劳试验旋转弯曲方法》[S].
- [4] Pešićka J, Kuzel R, Dronhofer A, et al. The evolution of dislocation density during heat treatment and creep of tempered martensitic ferrite steels [J]. Acta Materialia, 2003 (51): 4847-62.
- [5] 戈康达. S 著. 金属的疲劳与断裂 [M]. 颜鸣皋, 刘才穆, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
- [6] Chang S J, Ohr S M. Dislocation-free zone model of fracture [J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52 (12): 7174-7181.
- [7] Pearson S. The effect of mean stress on fatigue crack propagation in half-inch thick specimens of aluminium alloys of high and low fracture toughness [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1972, 4(1): 9-24.
- [8] 杨顺华. 晶体位错理论基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] 张志平. 裂纹扩展的简明机理和断裂力学中的切线模量理论 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 2003.
- [10] 胡庚祥, 蔡珣, 戎永华. 材料科学基础 [M]. 上海交通大学出版社, 2006.
- [11] 董丽虹, 徐滨士, 董世运, 等. 金属记忆技术用于再制造毛坯寿命评估初探 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 106-111.

作者地址: 上海市浦东民生路 1208 号 200135
Tel: (021) 3862 0648
E-mail: wuyw@shciq.gov.cn