

脉冲电流作用下 20 低碳钢的疲劳损伤恢复研究

刁爱民¹ 王景鹏^{2,3} 杨雨秋⁴ 刘纪德³ 郭敬东^{2,3}(1.海军工程大学舰船与海洋学院; 2.沈阳材料科学国家研究中心; 3.中国科学院金属研究所;
4.沈阳理工大学材料科学与工程学院)

摘要 研究了脉冲电流对 20 低碳钢疲劳损伤的修复及其机理。对预疲劳原始疲劳寿命的 60% 周次的试样进行脉冲电流处理, 修复其疲劳损伤, 再进行疲劳试验, 发现试样总的疲劳寿命比原始试样疲劳寿命延长了 41%。对比分析了脉冲电流处理对试样的微观组织形貌和力学性能的影响, 发现 20 钢在脉冲电流作用下未发生强化, 表明疲劳寿命的延长是由于脉冲电流的修复作用造成的。TEM 观察发现, 经过脉冲电流处理后, 疲劳试样铁素体中观察到的墙状位错结构部分消失, 位错分布更为均匀。此外, 脉冲电流处理可以有效地修复疲劳损伤材料的微观缺陷, 延长材料的服役寿命。

关键词 脉冲电流; 疲劳寿命; 损伤修复; 钢**中图分类号** TG113.25⁺5; TF761⁺2**文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.03.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Fatigue Damage Recovery of 20 Carbon Steel under Pulsed Current

Diao Aimin¹, Wang Jingpeng^{2,3}, Yang Yuqiu⁴, Liu Jide³, Guo Jingdong^{2,3}(1.College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering; 2.Shenyang National Laboratory for Materials Science; 3.Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences;
4.School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University)

Abstract: The fatigue damage recovery of 20 low carbon steel by pulse current as well as the mechanism were investigated. A pulse current was applied on the pre-fatigued specimens with 60% of the original fatigue life cycles to recover the fatigue damage, and the total fatigue life of the pulse current treated specimens is increased by 41% compared with the original ones. The effects of pulse current treatment on the microstructure and mechanical properties of the specimens were analyzed. The results reveal that absence of strengthening is observed in 20 low carbon steel under the action of pulse current, indicating that the prolongation of fatigue life is attributed to the recovery effect of pulse current. TEM observation reveals that after the pulse current treatment, the wall-like dislocation structure observed in ferrite of the fatigue specimens is partially disappeared, and the dislocation is more evenly distributed. Moreover, pulse current treatment may be an effective way to recover the micro-defects of fatigue-damaged materials, extending the service life of the materials.

Key Words: Pulse Current, Fatigue Life, Damage Recovery, Steel**收稿日期:** 2021-05-28; **修改稿收到日期:** 2021-09-28**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2020YFA0714900)**第一作者简介:** 刁爱民, 男, 1966 年出生, 教授, 武汉(430033), E-mail: 670088878@qq.com**通信作者:** 郭敬东, 男, 1968 年出生, 正高级工程师, 沈阳(110006), E-mail: jdguo@imr.ac.cn**引用格式:** 刁爱民, 王景鹏, 杨雨秋, 等. 脉冲电流作用下 20 低碳钢的疲劳损伤恢复研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(3): 318-322.

DIAO A M, WANG J P, YANG Y Q, et al. Fatigue damage recovery of 20 carbon steel under pulsed current[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(3): 318-322.

[11] WOOD J R. Producing Ti-6Al-4V plate from single-melt EBCHM ingot[J]. JOM, 2002(2): 56-58.

[12] 杜彬, 唐增辉, 张志斌, 等. TC4 合金的电子束冷床炉熔炼工艺[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(12): 2 989-2 995.

[13] VUTOVA K, MLADENOV G. Computer simulation of the heat transfer during electron beam melting and refining[J]. Vacuum, 1999, 53(1): 87-91.

[14] BLACHA L, GOLAK S, JAKOVICS A, et al. Kinetic analysis of aluminum evaporation from the Ti-6Al-7Nb alloy[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2014, 59(1): 276-278.

[15] 张永伟. TC4 组元挥发机制及配料参数的研究[D]. 昆明: 昆明理

工大学, 2018.

[16] 梁英教, 车荫昌, 刘晓霞, 等. 无机物热力学数据手册[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.

[17] 郭景杰, 苏彦庆. 钛合金 ISM 熔炼过程热力学与动力学分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.

[18] GAO L, HUANG H G, ZHANG Y Q, et al. Numerical modeling of EBCHM for large-scale TC4 alloy round ingots[J]. JOM, 2018, 70(12): 2 934-2 942.

[19] 樊生文. 译. 钛、锆及其合金的电子束熔炼[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.

(编辑: 刘晨辉)

疲劳断裂是一个损伤积累的过程,在这个过程中,先是材料的亚结构和显微结构发生变化,永久损伤形核;然后微裂纹产生、长大、合并形成主导裂纹;最后,裂纹稳定扩展至结构失稳^[1]。这里亚结构和显微结构的变化主要是指胞状结构和驻留滑移带的形成。显然,如果能够阻止疲劳过程中永久损伤及裂纹的萌生,或是通过某种方式降低胞状结构胞壁中的位错密度,使驻留滑移带分布均匀或部分消除,甚至使微裂纹愈合,那么材料的疲劳寿命就会延长。在工程材料的疲劳过程中,主导裂纹一般在总疲劳寿命的 70%~90% 处产生,因此可以通过中间恢复的方式使材料的疲劳寿命大幅延长。常用的疲劳损伤恢复方法有中间退火^[2~4]和热等静压^[5],其目的都是为了改变材料的位错组态、亚结构和显微结构的形态,碳化物的形态、结构和分布以及高温高压下微裂纹的焊合等。研究表明,高密度脉冲电流不仅能够降低位错密度、使位错分布更为均匀,也能实现微裂纹的愈合^[6~8]。CONRAD H 等^[9]、CAO W D 等^[10]和 LAI Z H 等^[11]在 Al、多晶 Cu、 α -Ti 的疲劳试验过程中施加连续的高密度脉冲电流,对其疲劳特征进行研究,发现脉冲电流能够使多晶 Cu 的疲劳寿命延长 2~3 倍,并降低沿晶断裂倾向,证明高密度脉冲电流对驻留滑移带 PSB 中的位错运动或次滑移系中的位错运动有影响。提高了滑移带的均匀性,且脉冲电流对疲劳寿命的影响随着所加应力的降低而增大,或者说对高周疲劳的影响要比对低周疲劳的大^[10]。对 α -Ti 的低周疲劳来说,脉冲电流不仅能够降低疲劳初期的软化速率,而且还可消除软化过程中的硬化峰^[11]。但在材料的实际使用过程中不可能对其施加脉冲电流,因此该方法无法获得实际应用。ZHOU B L^[12]从过程仿生的概念出发,提出在主导裂纹形成之前对疲劳试样进行脉冲电流处理,使其前期积累的永久损伤减少,达到恢复的效果,有望大幅延长材料的疲劳寿命。

沈以赴等^[13]研究了脉冲电流对低碳钢疲劳寿命的影响,发现经过脉冲电流处理后进行疲劳试验的试样的疲劳寿命延长并不显著,而先预疲劳一定周次(约为原始疲劳寿命的 62%)后卸载,再采用脉冲电流处理,再继续测试试样的疲劳寿命提高了一个数量级。该方法虽然大幅提高了材料的疲劳性能,但对于修复后材料的疲劳寿命远远超出材料的原始疲劳寿命,原因是修复造成的还是脉冲电流处理导致了材料的强化造成的仍未明确。本课题研究了脉冲电流对 20 钢疲劳寿命的影响,通过调整试验参数避免材料在脉冲电流作用下发生强化,进而探究了疲劳损伤在脉冲电流作用下的修复过

程及其微观机理。

1 试验方法

试验材料为 20 低碳钢,其化学成分为(质量分数): 0.19% 的 C、0.52% 的 Mn、0.21% 的 Si、0.93% 的 Cr,余量为 Fe。其屈服强度 $\sigma_{0.2} = 207$ MPa,抗拉强度 $\sigma_b = 400$ MPa,伸长率 $\delta = 25\%$ 。疲劳试样由电火花线切割机加工而成,并经过机械磨削和电解抛光处理,所用的抛光液为 5% 的高氯酸冰醋酸溶液,电流密度为 0.1 A/cm²。试样的形状及尺寸示意图见图 1,其标距部分的尺寸为 $3\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 。

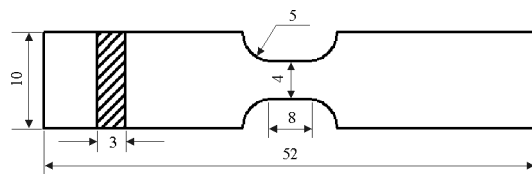


图 1 试样形状及尺寸

Fig.1 The configuration and dimension of specimen

将试样分为 3 组。A 组:不经过电脉冲处理,将试样直接疲劳至断裂,测得该组试样的原始疲劳寿命(约为 18.3 万周);B 组:先预疲劳 10 万周(约为平均原始疲劳寿命的 60%),然后卸载并用高密度脉冲电流处理,然后再继续疲劳至断裂;C 组:先进行脉冲电流处理,然后疲劳至断裂。

疲劳试验在 MTS10kN 疲劳试验机上进行。采用室温应力控制的拉-拉疲劳试验方式,最大拉应力为 290 MPa,应力比 $R(\sigma_{\min}/\sigma_{\max})$ 为 0.1;控制波形为正弦,频率为 40 Hz;试验环境为大气。脉冲电流由电容器脉冲放电产生,采用 TDS3012 记忆示波器记录脉冲电流波形,脉冲电流波形见图 2。最大电流密度 $j_m = 5.8$ kA/mm²,脉冲周期为 240 μ s,脉冲持续时间为 1.2 ms。采用扫描电镜(JSM-6301F)及透射电镜(Philips EM 420)观察脉冲电流处理前后试样微观组织的变化。

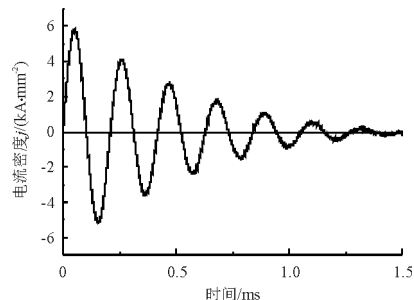


图 2 施加在试样上的脉冲电流密度波形图

Fig.2 Oscillogram of pulse current density applied to the specimen

2 试验结果与讨论

2.1 疲劳寿命

表 1 为试样的疲劳寿命和每组试样的平均疲劳寿命。可以看出,与 A 组相比,C 组试样的疲劳寿命并没有显著提高(提高了约 12%),B 组试样总疲劳寿命提高了 41%,对预疲劳阶段形成的疲劳损伤的恢复高达 76%。同组试样疲劳寿命值的离散度都在测试允许的范围。

表 1 试样的疲劳寿命

Tab.1 Fatigue life of specimens

组别	试样 编号	N_i	x_i	x_i^2	$\bar{N}_i$	$\bar{x}_i$	Σx_i^2
A	1	98 663	4.994 2	24.941 6	183 000	5.240 5	164.890 4
	2	170 635	5.232 1	27.374 5			
	3	182 550	5.261 4	27.682 1			
	4	157 855	5.198 3	27.021 9			
	5	287 239	5.458 2	29.792 4			
	6	199 003	5.298 9	28.077 9			
B	7	280 423	5.447 8	29.678 7	258 000	5.401 6	233.853 4
	8	258 928	5.413 2	29.302 5			
	9	228 882	5.359 6	28.752 4			
	10	279 396	5.446 2	29.661 3			
	11	259 359	5.413 9	29.310 3			
	12	172 532	5.236 9	27.424 8			
	13	309 770	5.491 0	3.151 5			
	14	275 723	5.440 5	29.598 8			
C	15	160 000	5.204 1	27.082 9	205 813	5.292 0	168.142 0
	16	220 764	5.343 9	28.557 6			
	17	129 581	5.112 5	26.138 0			
	18	333 992	5.523 7	3.511 7			
	19	161 250	5.207 5	27.118 1			
	20	229 289	5.360 4	28.733 7			

注: N_i 为第 i 个试样的疲劳寿命; x_i 为第 i 个试样疲劳寿命的对数值,即 $x_i = \lg N_i$; $\bar{N}_i$ 为第 i 个试样的平均疲劳寿命(循环次数); $\bar{x}_i$ 为第 i 个试样 x_i 的平均值

采用“ t 检验法”对 3 组疲劳试验结果进行分析^[14]。应用此对比检验法时必须满足两个母体的标准差相等,即 $\sigma_1 = \sigma_2$,要先通过 F 检验法检验这一条件是否成立。

(1)各组试样的疲劳寿命对数平均值及其方差

每组试样的个数分别为: $n_A = 6, n_B = 8, n_C = 6$;表 1 中各组试样疲劳寿命对数的平均值: $\bar{x}_A = 5.240 5, \bar{x}_B = 5.401 6, \bar{x}_C = 5.292 0$ 。

用下式计算各组试样的方差 s^2 :

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n-1} \quad (1)$$

得到 3 组试样的方差分别为: $s_A^2 = 0.022 46; s_B^2 = 0.006 1; s_C^2 = 0.021 87$ 。

(2)B 组试样的 F 检验

计算 F 检验时,把较大的方差作为分子,较小的方差作为分母,可得:

$$F = \frac{s_A^2}{s_B^2} = \frac{0.022 46}{0.006 1} = 3.68$$

对于 B 组试样,分子的自由度为 $6-1=5$,分母的自由度为 $8-1=7$;取显著度 $\alpha=5\%$,则由“ F 分布数值表”^[14]查得 $F_\alpha = 5.29$ 。

因为 $F = 3.68 < 5.29$,所以认为 B 组试样和 A 组试样的标准差相等,即 $\sigma_A = \sigma_B$,因此可以用 t 检验法对其进行显著性检验。

(3)B 组试样的 t 检验

用下式计算 t 值:

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1+n_2-2}} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (2)$$

$\bar{x}_1$ 为方差较大的那组试样的疲劳寿命对数的平均值,将 A 组和 B 组试样的相应的数值代入式(2)可得: $t = -2.697$,其自由度为 $6+8-2=12$ 。取 $\alpha=5\%$,查“ t 分布数值表”^[14]得 $t_\alpha = 2.179$ 。因为 $|t| > t_\alpha$,且 $\bar{x}_B > \bar{x}_A$,故可以认为 B 组试样的疲劳寿命与未经过脉冲电流处理的原始试样相比显著提高。

(4)B 组试样疲劳寿命提高的区间估计

选取置信度 $\gamma=95\%$,仍由“ t 分布数值表”查得 $t_\gamma = 2.179$;因为 $\bar{x}_B > \bar{x}_A$,所以区间估计式可以写作:

$$(\bar{x}_B - \bar{x}_A) - t_\gamma \sqrt{\frac{(n_A-1)s_A^2 + (n_B-1)s_B^2}{n_A+n_B-2}} \sqrt{\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B}} < \mu_B - \mu_A < (\bar{x}_B - \bar{x}_A) + t_\gamma \sqrt{\frac{(n_A-1)s_A^2 + (n_B-1)s_B^2}{n_A+n_B-2}} \sqrt{\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B}} \quad (3)$$

式中, $\mu_B - \mu_A$ 为母体平均值之差,即置信区间。 $\mu_A = \lg[N_{50}]_A, \mu_B = \lg[N_{50}]_B, \lg[N_{50}]_A$ 和 $\lg[N_{50}]_B$ 分别表示 A 组和 B 组试样所代表的母体的中值疲劳寿命。

可得

$$0.024 < \mu_B - \mu_A < 0.307 2 \quad (4)$$

即

$$0.024 < \lg[N_{50}]_B / \lg[N_{50}]_A < 0.307 2$$

$$1.06 < [N_{50}]_B / [N_{50}]_A < 2.03 \quad (5)$$

式(5)表明,以 95% 的置信度,在相同的疲劳试验条件下,B 组试样的疲劳寿命为 A 组试样的 1.06~2.03 倍。

(5)C 组试样的 F 检验和 t 检验

对于 C 组试样,分子和分母的自由度均为 $6-1=5$;取显著度 $\alpha=5\%$,则由“ F 分布数值表”查得 $F_\alpha = 7.15$,而通过计算得到 $F = 1.03$ 。因为 $F < F_\alpha$,所以认为 C 组试样和 A 组试样的标准差也相等,即 $\sigma_C = \sigma_A$,

因此可以用 t 检验法对 C 组试样进行显著性检验。

用式(2)计算得到 $t = 0.062$, 其自由度为 $6 + 6 - 2 = 10$ 。取 $\alpha = 5\%$, 查“ t 分布数值表”得 $t_\alpha = 2.228$ 。因为 $t < t_\alpha$, 故 C 组试样的疲劳寿命相对于原始试样来说没有显著变化, 即 C 组和 A 组试样疲劳寿命的差异完全是由于偶然因素造成的。

综上所述, 先预疲劳原始疲劳寿命的 60% 周次, 然后用脉冲电流处理, 再继续加载至失效的 B 组试样的总疲劳寿命(约 26 万周)相比原始疲劳寿命(约 18 万

周)显著提高, 而在相同的脉冲电流处理和疲劳试验条件下, 先用脉冲电流处理, 再直接疲劳至断裂的 C 组试样的疲劳寿命却几乎没有变化, 与原始疲劳寿命的差异完全在测试允许的误差范围之内。

2.2 微观组织结构与力学性能

图 3 分别为 3 组试样的组织形貌。可以看出, 脉冲电流处理前后试样中的相和结构没有发生改变, 都是珠光体和铁素体, 晶粒的大小也没有变化。这说明在脉冲电流处理过程中没有发生相变, 排除了试样因发生相变

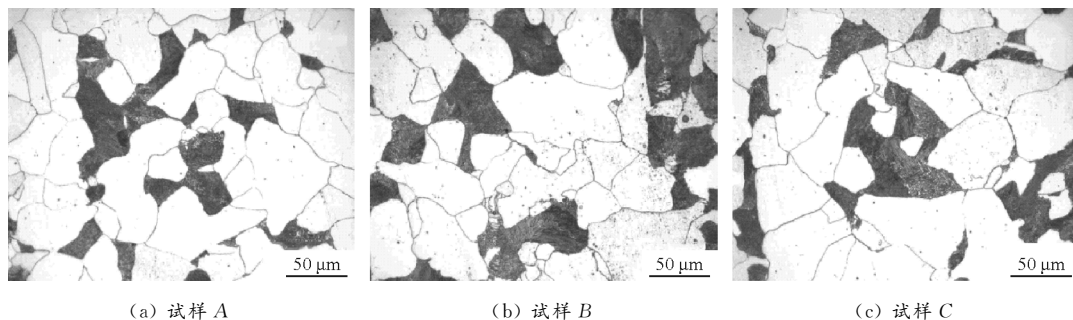


图 3 试样 A、B 和 C 的组织形貌

Fig.3 Morphologies of specimen A, B and C

等使材料强化的可能性。

脉冲电流处理前后 20 钢的拉伸力学性能见图 4。可以看出, 两条拉伸曲线几乎完全重合, 表明脉冲电流处理对 20 钢的力学性能(伸长率、屈服强度以及抗拉强度)基本没有影响, 进一步说明 B 组试样疲劳寿命的显著提高并不是因为材料在脉冲电流的作用下发生了强化, 而是由于脉冲电流部分消除了预疲劳阶段积累的疲劳损伤导致的。

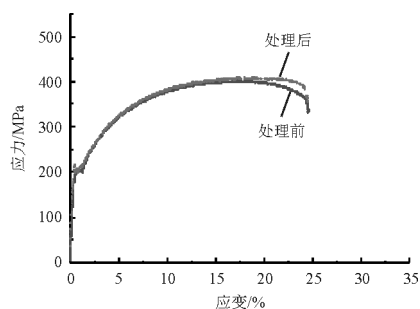


图 4 脉冲电流对 20 钢力学性能的影响

Fig.4 Effects of pulse current on mechanical properties of 20 steel

2.3 脉冲电流作用下钢中疲劳损伤恢复的机理讨论

由于试样的预疲劳周次仅为原始疲劳寿命的 60%, 对于钢等工程材料来讲, 在这个阶段还不会形成直接导致试样断裂失效的主导裂纹, 而主要是胞状结构、驻留滑移带的形成以及微裂纹的萌生。脉冲电流对疲劳损伤的恢复也必然是通过对这些微观结构的影响而实现的。

图 5 为 B 组试样在脉冲电流处理前后位错结构的变化。由图 5a 可以看出, 位错墙内位错密度非常高; 而经过脉冲电流处理后, 这种墙结构部分消失, 位错分布更为均匀, 见图 5b。

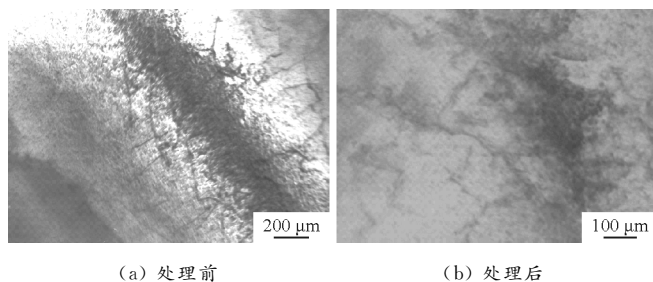


图 5 脉冲电流作用下钢中疲劳损伤恢复

Fig.5 Recovery of fatigue damage in steel under pulse current

由电流引起的试样的平均温升可用下式计算^[6]:

$$\Delta T = \rho j_m^2 t_p (c_p d)^{-1} \quad (6)$$

式中, ΔT 为平均温升; ρ 为电阻率; j_m 为最大电流密度; t_p 为脉冲周期; c_p 为比热容; d 为密度。对于 20 钢, 取 $\rho = 0.530 \times 10^3 \mu\Omega \cdot m$, $c_p = 519 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $d = 7.87 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$, $t_p = 120 \mu\text{s}$, 可以计算出脉冲电流处理过程中试样的最大瞬时温升为 313°C 。

脉冲电流的作用过程是个快速升温过程, 试样在快速加热时, 其膨胀过程与温升过程不同步, 表现为膨胀滞后于温升, 这样即便是在自由边界条件下也会在试样中产生热压应力^[15]。由此产生的热压应力为:

$$\sigma(t) = E\alpha\Delta T_{\max} [\Theta(t) - l(t)] \quad (7)$$

式中, E 为弹性模量; α 为膨胀系数; $\Theta(t)$ 是任一时刻 t

的无因次温升, $\Theta(t) = \Delta T(t) / \Delta T_{\max}$, 其中, $\Delta T(t)$ 为瞬时的温度变化; $\Delta T_{\max}$ 为最大温度变化; $l(t)$ 为无因次膨胀长度; $l(t) = \Delta L(t) / \Delta L_{\max}$, 其中 $\Delta L(t)$ 为瞬时长度变化; $\Delta L_{\max}$ 为最大长度变化。

最大热压应力可由下式计算^[7]:

$$\sigma_{\max} = E\alpha\Delta T_{\max} \quad (8)$$

根据式(8)计算可得脉冲电流处理过程中试样中的最大瞬时热压应力为 408 MPa。

墙结构中的位错在热压应力的作用下将发生运动, 由异号刃型位错组成的偶极子, 如果运动到两位错之间的距离小于 1.6 nm (刃型位错发生湮灭的临界距离), 位错将湮灭而使墙内位错宽度降低, 甚至使位错墙结构局部消失^[7]。另外, 墙结构中的位错线也可能从墙中释放, 进入墙间的低应变区域, 从而使位错分布均匀化。墙结构中位错的湮灭以及位错分布的均匀化即是疲劳损伤恢复的体现。

此外, 定向漂移电子与原子碰撞会产生电子风力, 电子风力会促进位错的运动。直接作用在单位长度位错上的电子风力 F_{ew} 可表示为^[16]:

$$F_{ew} = \alpha \mathbf{b} p_F (j/e - n_e v) \quad (9)$$

式中, $\alpha = 0.33$; $\mathbf{b}$ 为柏氏矢量; $p_F = 2E_F / v_F$ (v_F 为费米速度); j 为电流密度; e 为电子电荷; n_e 为电子密度; v 为位错运动速度。由于 $F_{ew} = \tau_{ew} \mathbf{b}$, 可以得到电子风作用于位错上的应力 τ_{ew} 。 τ_{ew} 与材料的属性无关, 只取决于电流密度。电子风力对位错运动的促进作用会加速位错的湮灭。

同时, 预疲劳阶段形成的微裂纹在脉冲电流的作用下可能愈合。ZHOU Y Z 等^[17]研究表明, 高密度脉冲电流 ($j_m = 5.3, 2.3 \text{ kA/mm}^2$) 能使 45 钢中的部分淬火裂纹和预制裂纹愈合, 并提出了 3 种愈合机制: ①由瞬时热压应力引起的压合机制; ②由位错运动引起的原子填充机制; ③由快速扩散引起的原子填充机制。在该试验中, 试样中的最大热压应力为 408 MPa, 该应力可能使试样中的微裂纹得到愈合或部分愈合, 而微裂纹的愈合将显著提高材料的疲劳寿命。

3 结 论

(1) 脉冲电流处理可以有效地修复疲劳损伤 20 钢试样的微观缺陷, 延长试样的疲劳寿命。对预疲劳原始疲劳寿命 60% 周次的试样进行脉冲电流恢复处理, 其总的疲劳寿命比原始疲劳寿命提高 41%。

(2) 脉冲电流处理延长 20 钢疲劳寿命的原因是脉冲电流部分地消除了预疲劳阶段积累的疲劳损伤, 而不

是材料在脉冲电流的作用下发生了强化。

(3) 脉冲电流作用下疲劳损伤恢复的机制可能是电子与位错的相互作用使预疲劳阶段积聚的位错部分湮灭和均匀化, 另外微裂纹可能在脉冲电流处理过程中由于压应力的作用而愈合。

参 考 文 献

- [1] SURESH S. 材料的疲劳[M]. 王中光 译. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [2] 杨晓华, 李年. 2Cr13 钢高周疲劳微塑性损伤特性研究[J]. 金属热处理学报, 1999(2): 33-38.
- [3] 郭廷良, 王德俊, 杨化仁. 45 钢疲劳损伤及热处理恢复机理的研究[J]. 金属热处理, 2001(6): 23-25.
- [4] 方铭, 杜百平. 疲劳损伤及中间退火修复的 40Cr 试件的微观结构分析[J]. 机械强度, 2003(2): 207-211.
- [5] 马宝钿, 杜百年, 朱维平, 等. 疲劳损伤件中温热等静压后的疲劳性能试验研究[J]. 理化检测-物理分册, 2002, 38(5): 185.
- [6] GUO J D, WANG X L, DAI W B. Microstructure evolution in metals induced by high density electric current pulses[J]. Materials Science and Technology, 2015, A31(13): 1 545-1 554.
- [7] XIAO S H, GUO J D, WU S D, et al. Recrystallization in fatigued copper single crystals under electropulsing[J]. Scripta Materialia, 2002, 46(1): 1-6.
- [8] ZHOU Y Z, ZENG Y, HE G H, et al. The healing of quenched crack in 1045 steel under electropulsing[J]. J. Mater. Res., 2001, 16(1): 17-19.
- [9] CONRAD H, WHITE J, CAO W D, et al. Effect of electric field on cavitation in superplastic aluminum alloy 7475[J]. Materials Science and Engineering, 1991, A138(2): 247-258.
- [10] CAO W D, CONRAD H. On the effect of persistent slip band (PSB) parameters on fatigue life[J]. Fatigue Frag. Eng. Metal. Struct., 1992, 15(6): 573-583.
- [11] LAI Z H, MA C X, CONRAD H. Cyclic softening by high density electric current pulses during low cycle fatigue of α -Ti[J]. Scripta Metall., 1992, 27(5): 527-531.
- [12] ZHOU B L. Bio-inspired study of structural materials[J]. Materials Science and Engineering, 2000, 11(1): 13-18.
- [13] 沈以赴, 周本濂, 何冠虎, 等. 材料疲劳恢复新途径的探索 I-低碳钢疲劳寿命的延长[J]. 材料研究学报, 1996(2): 165-166.
- [14] 熊峻江. 疲劳断裂可靠性工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [15] TANG D W, ZHOU B L, CAO H, et al. Thermal-stress relaxation behavior in thin-films under transient laser-pulse heating[J]. J. Appl. Phys., 1993, 73(8): 3 749-3 752.
- [16] NABARRO F R N, HIRTH J P. Dislocations in Solids[M]. Amsterdam: Elsevier, 1989.
- [17] ZHOU Y Z, QIN R S, XIAO S H, et al. Reversing effect of electropulsing on damage of 1045 steel[J]. J. Mater. Res., 2000, 15(5): 1 056-1 061.

(编辑: 彭瑾)