

• 组织和性能 •

Ni 对中碳高强度弹簧钢腐蚀疲劳性能的影响

孙曼丽^{1,2} 惠卫军^{1,2} 张代明² 董瀚¹ 翁宇庆^{1,3}

(1 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; 2 昆明理工大学材料与冶金学院,昆明 650093; 3 中国金属学会,北京 100711)

摘要 采用加速腐蚀(5% NaCl 盐雾)试验和旋转弯曲疲劳试验,研究了 0.52% ~ 1.00% Ni 对 2 000 MPa 级中碳弹簧钢 NHS(% : 0.44 ~ 0.45C, 1.95 ~ 2.08Si, 0.68 ~ 0.70Mn, 0.90 ~ 0.92Cr, 0.14 ~ 0.15V) 腐蚀疲劳性能的影响。结果表明,增加 NHS 钢中的 Ni 含量,腐蚀坑深度降低,在 5% NaCl 水溶液中钢的点蚀电位增加,从而导致腐蚀疲劳强度提高。与传统的 60Si2CrVA 弹簧钢相比,NHS 弹簧钢呈现出良好的耐腐蚀疲劳性能。

关键词 Ni 中碳高强度弹簧钢 腐蚀疲劳

Effect of Ni on Corrosion Fatigue Properties of Medium Carbon High Strength Spring Steel

Sun Manli^{1,2}, Hui Weijun^{1,2}, Zhang Daiming², Dong Han¹ and Weng Yuqing^{1,3}

(1 National Engineering Research Center of Advanced Steel Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 3 The Chinese Society for Metals, Beijing 100711)

Abstract The effect of 0.52 ~ 1.00 Ni on corrosion fatigue properties of 2 000 MPa grade medium carbon spring steel NHS (0.44 ~ 0.45C, 1.95 ~ 2.08Si, 0.68 ~ 0.70Mn, 0.90 ~ 0.92Cr, 0.14 ~ 0.15V) has been studied by using accelerated corrosion (5% NaCl salt spray) test and rotating bending fatigue test. Results indicated that with increasing the Ni content in steel NHS, the depth of corrosion pits in steel decreased and the corrosion pitting potential of steel in 5% NaCl aqueous solution increased as a result to increase the corrosion fatigue strength and life of the steel. As compared with conventional spring steel 60Si2CrVA, the spring steel NHS presented better anti-corrosion fatigue properties.

Material Index Ni, Medium Carbon High Strength Spring Steel, Corrosion Fatigue

1 实验钢和方法

实验用不同镍含量的中碳高强度弹簧钢 NHS 和对比的 60Si2CrVA 弹簧钢的化学成分见表 1。NHS 钢在 50 kg 真空感应炉中冶炼,锻成 Φ16 mm 圆棒和 15 mm × 60 mm 矩形坯。60Si2CrVA 钢为外

购 Φ26 mm 的圆棒。旋转弯曲疲劳试样工作直径 (5.97 ± 0.02) mm (图 1)、腐蚀片 4 mm × 15 mm × 20 mm 及标准拉伸试样 $L_0 = 5d_0$, $d_0 = 5$ mm。NHS 钢和 60Si2CrVA 钢的淬火温度分别为 925 °C 和 850 °C, 回火温度分别为 350 °C 和 410 °C。

表 1 实验钢的化学成分、强度和疲劳性能
Table 1 Chemical composition and Mechanical properties of test steels

钢种	化学成分/%									强度/MPa		疲劳性能/MPa		$\frac{\sigma_{-1}}{R_m}$
	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	P	S	Al	$R_{p0.2}$	R_m	σ_{-1}	R_m	
NHS-10	0.45	1.95	0.68	0.92	0.52	0.14	0.009	0.005	0.018	1 765	2 045	910	0.44	
NHS-11	0.44	2.08	0.70	0.90	1.00	0.15	0.005	0.004	0.030	1 780	2 060	-	-	
60Si2CrVA	0.62	1.62	0.49	0.88	-	0.18	0.007	0.003	0.018	1 745	1 915	780	0.41	

在 FQY-010 型盐雾腐蚀试验箱中按照 GB/T 10125-1997 标准进行中性盐雾实验(NSS)。实验溶液为 pH 值约 7.0 的 5% NaCl 水溶液,实验温度为 (35 ± 0.5) °C, 盐水喷雾 8 h → 干燥, 60% RH, 16 h 循环为一个周期。其中疲劳试样腐蚀 10 个周期, 腐蚀片分别腐蚀 3、7、10 和 14 周期。取出腐蚀后的试样(疲劳试样和腐蚀片),按 GB/T16545-1996 清除其

表面的腐蚀产物。按照 GB/T18590-2001,采用放大范围为 20 ~ 1 000 倍且带有微调旋钮的 Leica 型光学显微镜测量腐蚀坑深度。

采用国产 PQ1-6 型旋转弯曲疲劳试验机测定腐蚀前后疲劳试样的疲劳性能。实验频率 $n = 5 000$ r/min, 载荷比 $R = -1$, 控制参量为载荷, 指定 1×10^7 周次为疲劳寿命极限, 用升降法求条件疲劳极限。

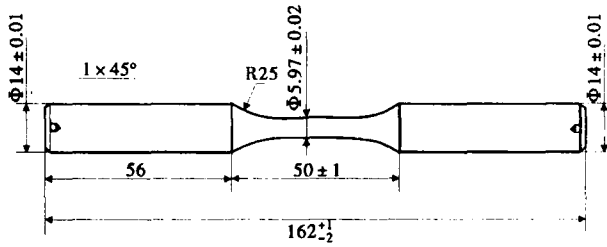


图 1 旋转弯曲疲劳试样
Fig. 1 Specimen for rotating bending fatigue test

从冲击试样上切取 5 mm × 10 mm × 10 mm 极化试样,经磨光抛光后在 5% NaCl 溶液中测量实验料的极化曲线。测量温度为 35 °C,辅助电极采用铂电极,研究电极为实验料。测试的有效面积为 1

cm² 即(10 mm × 10 mm),参比电极为饱和甘汞电极(SCE),动电位扫描的速度为 20 mV/min。采用的电化学测量系统为 M273A 型恒电位仪测量。

2 实验结果

图 2(a) 为实验钢光滑试样在空气中的旋转弯曲疲劳 S-N 曲线。从图 2(a) 可见, NHS 钢的疲劳强度和疲劳寿命均明显高于 60Si2CrVA 钢。对疲劳断口的 SEM 观察结果表明,在 NHS 钢的高应力幅短寿命区,疲劳破坏主要起源于试样表面基体(图 3a),在低应力幅长寿命区,疲劳破坏则主要起源于非金属夹杂(图 3b);无论在高应力幅还是低应力幅区,外购 60Si2CrVA 钢的疲劳破坏大多起源于夹杂物。

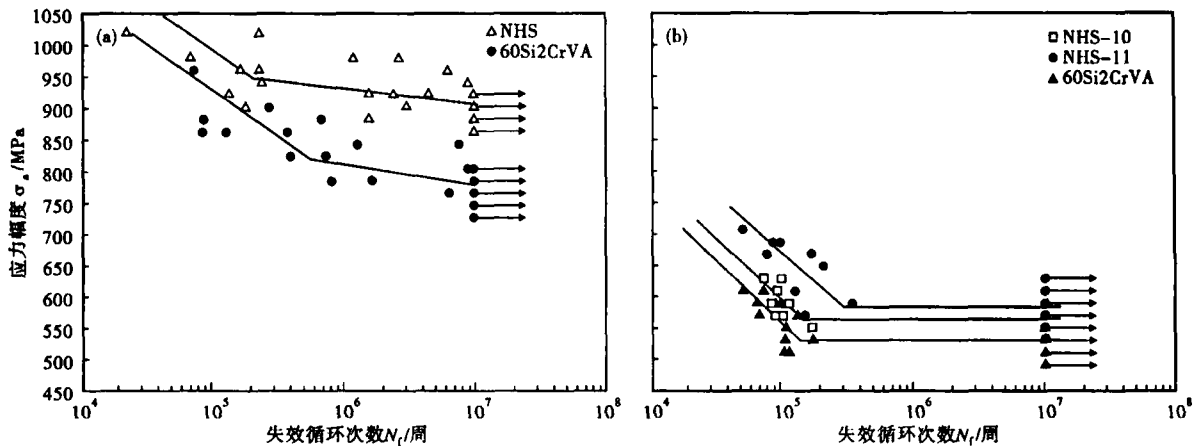


图 2 实验钢疲劳 S-N 曲线:(a) 未腐蚀;(b) 10 周期,盐雾腐蚀
Fig. 2 Fatigue S-N curves of test steels: (a) non-corrosion; (b) after salt spray corrosion for 10 test-periods

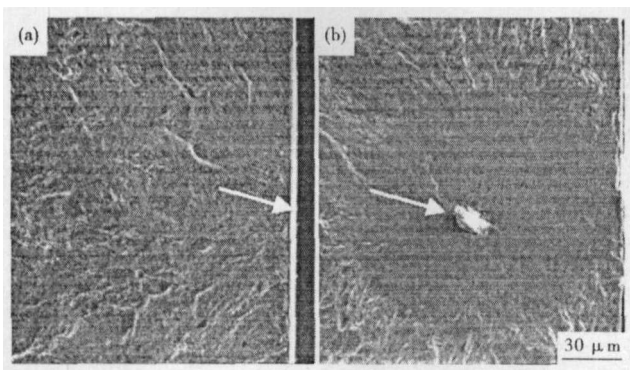


图 3 未腐蚀 NHS 钢的典型疲劳断口形貌,SEM:(a) 起裂于试样表面;(b) 起裂于试样内夹杂物
Fig. 3 Morphology of typical fatigue fracture of non-corrosion steel NHS: (a) crack initiating from surface of specimen; (b) crack initiating from inclusion in specimen

表 1 给出了实验钢的强度及疲劳性能,可见, NHS 钢的疲劳强度比明显高于 60Si2CrVA 钢。

图 2(b) 为实验钢经 10 个周期中性盐雾试验后在空气中的旋转弯曲疲劳(即腐蚀疲劳)的 S-N 曲

线。可见,腐蚀疲劳强度 $\sigma_{-1(NHS-11)} > \sigma_{-1(NHS-10)} > \sigma_{-1(60Si2CrVA)}$, 即 NHS 钢与 60Si2CrVA 钢相比有较好的腐蚀疲劳性能。NHS-11 钢的腐蚀疲劳强度高于 NHS-10 钢,这说明提高钢中 Ni 含量有利于进一步改善 NHS 钢的腐蚀疲劳性能。对腐蚀疲劳断口的 SEM 观察结果表明,所有的腐蚀疲劳断裂均源于试样表面的腐蚀坑底部(图 4)。

由图 5 可见,7 个周期后 NHS-10 钢的腐蚀坑深度增加程度比 NHS-11 钢更明显。可见钢中添加 Ni 后可抑制腐蚀坑的形成及长大^[1]。60Si2CrVA 钢的腐蚀坑深度从腐蚀初期开始就比 NHS 钢的腐蚀坑深度大,随着腐蚀时间的延长,腐蚀坑深度迅速增加。

3 讨论

图 6 表明,极化曲线中点蚀电位 $E_{b(60Si2CrVA)} < E_{b(NHS-10)} < E_{b(NHS-11)}$, 进一步说明 NHS 钢的耐点蚀能力优于 60Si2CrVA 钢,即增加 Ni 含量可以提高钢的

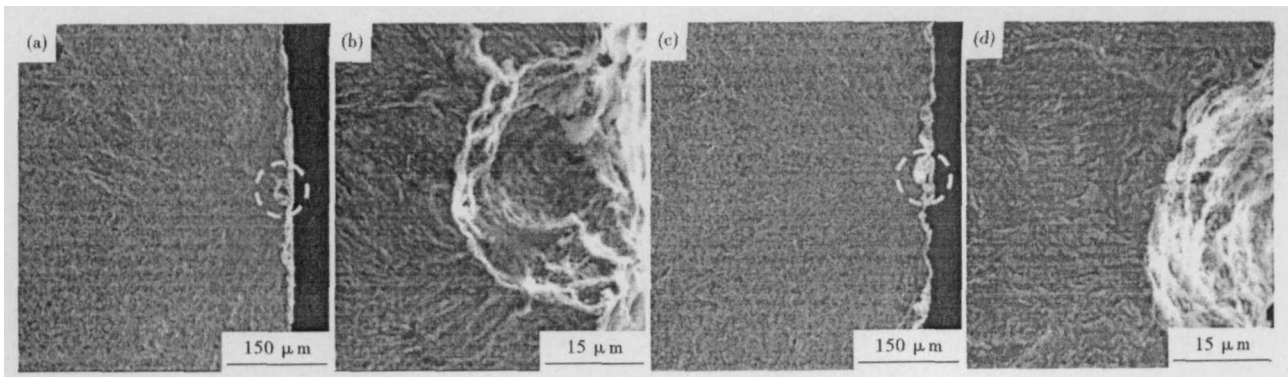


图 4 实验钢试样表面腐蚀疲劳断口源区的形貌, SEM: (a) (b) NHS 钢; (c) (d) 60Si2CrVA 钢

Fig. 4 Morphology of corrosion fatigue crack initiating from surface of specimen of test steels, SEM: (a) (b) steel NHS; (c) (d) steel 60Si2CrVA

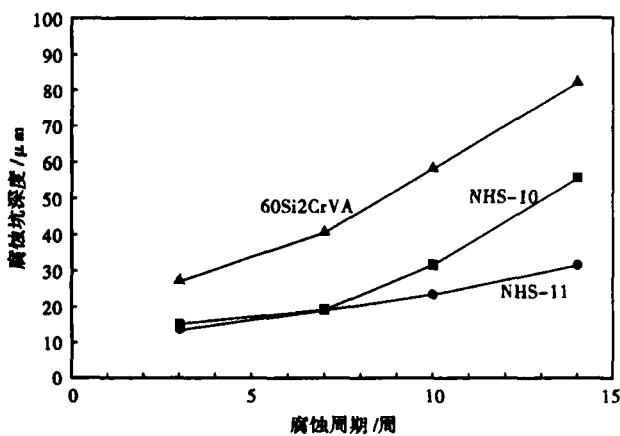


图 5 腐蚀周期对试验钢腐蚀坑深度的影响

Fig. 5 Effect of corrosion test periods on depth of corrosion pit of test steels

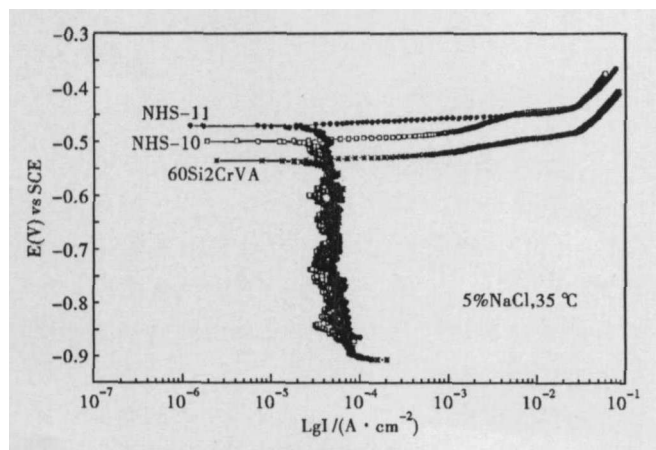


图 6 实验钢的极化曲线

Fig. 6 Anodic polarization curves of test steels

点蚀电位, 从而控制腐蚀坑的产生及长大。

Ni 的热力学稳定性比 Fe 高, 向铁基合金中加入 Ni 时能提高 Fe 的热力学稳定性, 从而提高合金整体的耐腐蚀性^[2], 抑制了腐蚀坑的产生。另一方面, Ni 属于易钝化的合金元素, 添加易钝化元素是

提高合金耐蚀性的有效方法^[3]。Ni 聚集在锈层中, 有 Ni 存在的地方 Cl 就比较少, 因此 Ni 能有效地阻止 Cl 的入侵, 提高基体耐蚀性和材料腐蚀疲劳性能^[4-6]。

4 结论

(1) 实验钢光滑疲劳试样的疲劳破坏主要源于钢中非金属夹杂物或者基体, 而腐蚀后疲劳试样的疲劳断裂均由腐蚀坑引起, 且腐蚀疲劳强度与腐蚀坑深度有很大关系。

(2) 增加 NHS 钢的 Ni 含量, 腐蚀坑深度降低, 在 5% NaCl 水溶液中的点蚀电位增加, 使腐蚀疲劳强度增加。NHS 钢的耐腐蚀疲劳性能明显优于 60Si2CrVA 弹簧钢。

国家重点基础研究发展规划项目资助 (973) (2004CB619104)

参考文献

- 1 Akio Yoneguchi, Jeffrey Schaad. Development of New High Strength Spring Steel and its Application to Automotive Coil Spring. 2000 Society of Automotive Engineers, inc, 2000, 01: 0564
- 2 马特松 E, 黄建中. 腐蚀基础. 北京: 冶金工业出版社, 1990
- 3 黄建忠, 左 禹. 材料的耐腐蚀性和腐蚀数据. 北京: 化学工业出版社, 2003
- 4 Tomohiro Nakano, Takayuki Sakakibara, Masami Wakita. Development of High-strength Suspension Coil Springs with Improved Corrosion Fatigue Strength. China International Ferrous Wire Symposium 2004, 2004: 254
- 5 中山武典, 岩田多加志, 长尾 护. 高强度懸架ばね用鋼の腐食疲労特性とその改善. 神戸製鋼技報, 1997, 47(2): 53
- 6 福住 達夫, 駒崎 慎一, 三澤 俊平. 合金元素および化学的不働態化处理により耐孔食性を改善した自動車用ばね鋼の孔食起点水素脆化および腐食疲労特性. 鉄と鋼, 2002, 88(1): 31

孙曼丽 (1980-), 女, 硕士研究生, 2005 年安徽工业大学毕业, 高强度弹簧钢研究。