

铁素体-马氏体复相钢 疲劳裂纹扩展和闭合效应

邓蓉英 叶智军

(中国科学院力学研究所)

刘淑华 邹定强

(铁道科学研究院)

摘要 本文研究铁素体-马氏体复相钢中铁素体含量对裂纹萌生、扩展和裂纹尖端塑性变形的影响。在24.2—41.5%的铁素体含量范围内,以33.8%含量的复相钢裂纹萌生期 N_0 较长、门槛值 ΔK_{th} 高、并有低的扩展速率和较高的闭合应力强度因子 K_{Cl} 。

三种铁素体含量复相钢的 $da/dN-\Delta K_{eff}$ 一致的事实,表明裂纹闭合对低速扩展的重要作用,且闭合程度(K_{Cl}/K_{max})随裂纹尖端 ΔK 的降低而提高,在 ΔK_{th} 时达到最大。铁素体含量为33.8%的 K_{Cl}/K_{max} 值最高达0.7。

关键词 复相钢, 疲劳裂纹, 闭合效应

经两相区处理的复相钢有较好的综合性能,这引起了科学工作者的重视并开展了不少的研究^[1-4]。复相钢在交变应力作用下,因铁素体和马氏体性能的差异造成组织内部塑性流变的不均匀和不协调,因而有关疲劳裂纹萌生、扩展与断裂过程都比单一组织复杂得多,而且受各组织的含量、形状和大小的影响。本文仅就复相钢中铁素体含量的影响进行研究和探索。

1 试验方法

将16mm厚的16MnR轧板,经3个不同温度780,810和850℃两相($\alpha+\gamma$)区加热淬火和200℃回火处理,分别编为试样I、II、III号。经金相分析和显微硬度测量,在20个视场分别对3种试样测量13288,16515和18549点。测量结果表明,加热温度越高,铁素体量越少,马氏体的显微硬度越低。轧制态和3种试样的铁素体量、马氏体显微硬度和拉伸试验结果见表1。铁素体含量用QUANTIMET520相分析仪测定。观测裂纹尖端的塑性变形采用了VERSAMEG-2微波干涉显微镜。

1989年3月27日收到初稿;1989年7月17日收到修改稿

本文通讯联系人:邓蓉英,北京(100080)中国科学院力学研究所

A201

表 1 试验钢的铁素体量、马氏体显微硬度和力学性能
Table 1 Ferrite content, F %, martensite microhardness, M HV,
and mechanical properties of steels tested

Code	F %	M HV	σ_b MPa	σ_s MPa	$\frac{\sigma_s}{\sigma_b}$	E MPa	n	ψ %	δ %
Asrolled			545	367	0.67	2.48×10^5	0.174	68.7	16.7
I	41.5	342	930	603	0.65	1.82×10^5	0.120	43.1	10.3
II	33.8	241	984	720	0.73	1.52×10^5	0.094	44.9	11.2
III	20.2	196	1021	755	0.74	1.94×10^5	0.085	42.5	7.9

利用载荷递减法测定 ΔK_{th} 值, 并将裂纹扩展速率 $da/dN \leq 10^{-10} \text{m/cyc}$ 时裂纹尖端的 ΔK 定义为 ΔK_{th} 值。

2 试验结果和分析

2.1 裂纹萌生

试验在 $R=0.3, \Delta P=2.94 \times 10^{-3} - 9.81 \times 10^{-3} \text{MN}$ 和 $3.82 \times 10^{-3} - 12.75 \times 10^{-3} \text{MN}$ 两种载荷条件下进行。反复加载的初期阶段在缺口附近观察到滑移带, 随着加载进行发展成微裂纹。并观察到裂纹更多的是在铁素体和马氏体之间的相界处萌生(图 1)。当 $\Delta P=6.86 \times 10^{-3} \text{MN}$ 时, 缺口附近的微裂纹逐渐长大和连接, 汇成一条主裂纹。而 ΔP 增大为 $8.92 \times 10^{-3} \text{MN}$ 时, 开始数条微裂纹同时发展, 待长度为 $0.3-0.6 \text{mm}$ 之后, 只有其中的一条得以发展而其余的被抑制。两种加载范围的试验结果都表明复相钢的 N_0 较轧制态为长。同时 N_0 与铁素体量有关。当含量为 33.8% 时, N_0 最长, 见表 2。

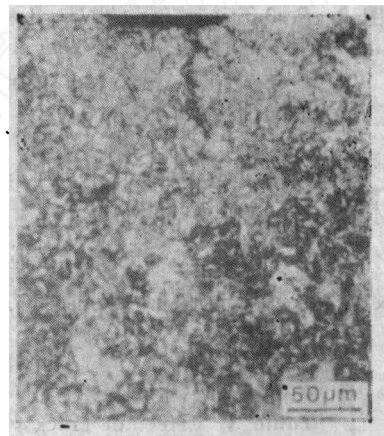


图 1 裂纹萌生

Fig. 1 Crack initiation
at $\Delta p=6.86 \text{ kN}$

2.2 裂纹扩展和闭合效应

裂纹在近门槛区和中速区扩展试验结果表明, $R=0.3$ 复相钢近门槛区扩展比轧制态慢(图 2), ΔK_{th} 值高

表 2 试验钢的 $N_0, \Delta K_{th}$ 和 K_{c1} 值
Table 2 $N_0, \Delta K_{th}$ and K_{c1} of steels tested

Code	$N_0 \times 10^5$ cycle		ΔK_{th} , MPa·m ^{1/2}	K_{c1} MPa·m ^{1/2}	
	$\Delta p=6.86 \text{ kN}$	$\Delta p=8.92 \text{ kN}$		$R=0.3$	$R=0.7$
I	4.23	1.22	7.90	4.73	5.30
II	6.69	3.74	8.99	3.92	8.93
III	5.99	2.98	8.34	4.20	7.72
As rolled	1.10	0.43	6.85	4.20	5.37

(表 2)。都受铁素体含量的影响, 但其影响并非线性的, 当铁素体含量为 33.8% 的复相钢 ΔK_{th} 最高, 扩展速率最慢, 表现出最佳的裂纹扩展抗力。在 $R=0.7$ 时, 铁素体量的

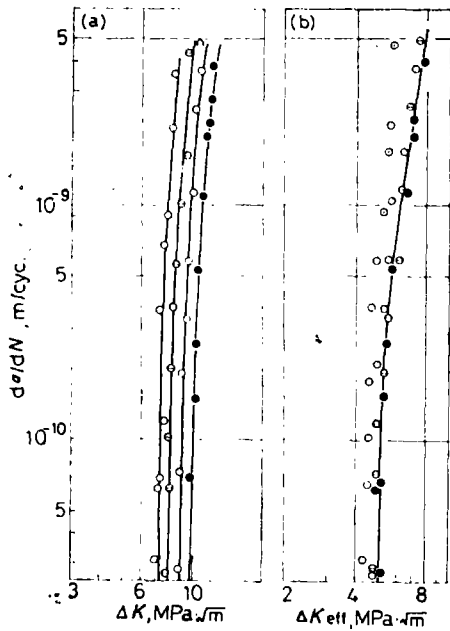


图2 R=0.3近门槛区da/dN与ΔK和ΔK_{eff}的关系
 Fig. 2 (a) da/dN vs ΔK near threshold, R=0.3;
 (b) da/dN vs ΔK_{eff} near threshold, R=0.3
 I—○; II—●; III—○; As rolled—⊙

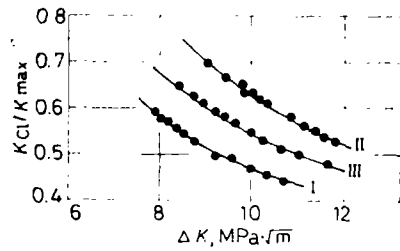


图3 R=0.3近门槛区K_{c1}/K_{max}与ΔK的关系
 Fig. 3 K_{c1}/K_{max} vs ΔK near threshold, R=0.3

影响甚小。根据文献 [5, 6], 计算出四种材料的 K_{c1} 值 (见表 2)。

若考虑裂纹尖端的闭合效应, 用 ΔK_{eff} 来表征裂纹在低速区扩展的推动力, 则三种铁素

表 3 裂纹在 ΔK_{th} 时的闭合影响和 II 阶段扩展

Table 3 Effect of crack closure at threshold and II stage propagation

Code	K _{c1} /K _{max} at threshold		Paris law	
	R=0.3	R=0.7	c	m
I	0.59	0	1.86×10 ⁻¹²	2.72
II	0.70	0	6.88×10 ⁻¹¹	2.42
III	0.65	0	5.96×10 ⁻¹²	2.87
As rolled	0.57	0	6.17×10 ⁻¹¹	2.42

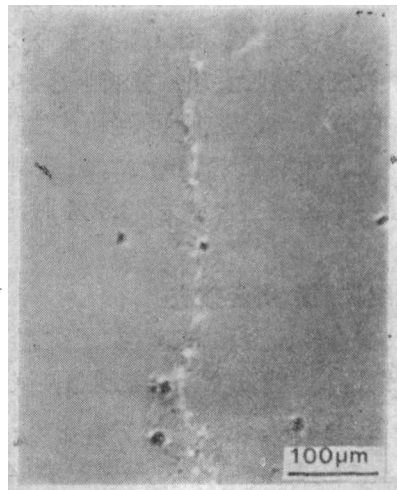


图 4 33.8% 铁素体裂纹尖端塑性变形和微裂纹
 Fig. 4 33.8% ferrite plastic deformation and microcrack at crack tip

体含量的复相钢的裂纹扩展可以近似地用一条曲线来描述, 如图 (2b)。按照双对数坐标的直线关系处理, 可表达为

$$da/dN = 4.2141 \times 10^{-17} (\Delta K_{eff})^{9.1026}$$

或

$$da/dN = 4.2141 \times 10^{-17} (K_{max} - K_{c1})^{9.1026}$$

三种材料共 28 点拟合, 相关系数 r = 0.9335。

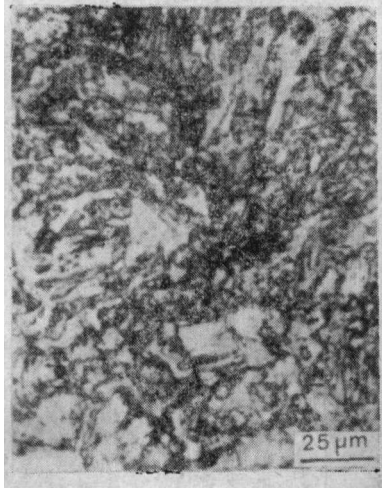


图 5 裂纹扩展路径
Fig. 5 Crack propagation path

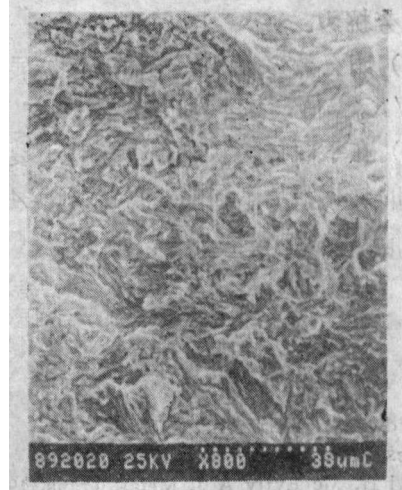


图 6 近门槛区裂纹扩展断口形貌
Fig. 6 Fracture morphology of crack propagation near threshold

这一事实充分表明了材料的 K_{cl} 对裂纹在低速区扩展的重要作用, 以 K_{cl}/K_{max} 来表征闭合影响的程度, 从图 3 看出, 低 R 条件下, ΔK 越低, 闭合影响越大. 这和近来一些研究^[7-9]的结果一致. 三种复相钢以 33.8% 铁素体的闭合影响最大, 在 ΔK_{th} 值达 0.7. 这就说明了该材料在低速区扩展最慢的原因. 由于 $R=0.7$ 裂纹尖端的 K_{min} 高于 K_{cl} , 因此, 在 ΔK_{th} 值, $K_{cl}/K_{max}=0$, 无闭合影响.

裂纹在中速区扩展结果表明, 除含 24.2% 铁素体的材料 da/dN 稍低而外, 其余的相差很小. 表 3 给出 Paris 定律的常数 c 和指数 m .

2.3 塑性区和裂纹扩展路径观察

裂纹扩展试验后, 在显微镜下沿裂纹扩展方向进行连续观察, 在裂纹两旁清晰可见波纹状的浮凸 (图 4), 测量与裂纹呈垂直方向的单调塑性区尺寸 R_y . 因单调塑性区在本质上和裂纹尖端的 K_{max} 有关, Irwin 在理论上指出 R_y 与 $(K_{max}/\sigma_s)^2$ 成正比, 据此, 由试验测出的 R_y 与对应的 $(K_{max}/\sigma_s)^2$ 作图得到两者之间的比例常数 A , 结果表明, A 值对铁素体极为敏感. 铁素体量大的 A 值也大. 这可能与铁素体较易发生塑性流动有关, 不仅如此 A 值还与裂纹尖端应力场强度有关. 这一结论与单相奥氏体钢^[10]的结果一致, 不同的是三种复相钢的 A 值在门槛区都增加了. ($\Delta K=25-40\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时 0.045, 0.0109, 0.0088; $\Delta K=8-9\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时为 0.0502, 0.0284, 0.0153).

金相分析结果还表明, 裂纹是以穿过马氏体基体或马氏体与铁素体的相界方式向前扩展 (图 5).

在 SEM 下观察 $da/dN=10^{-10}-5 \times 10^{-8}\text{m}/\text{cyc}$ 范围内的断裂面, 断口形貌主要为穿晶准解理, 并多显现出板条马氏体的显微形态. 在图 6 的方框内观察到解理断裂, 它的形状和尺寸与铁素体相当. 因此, 铁素体是解理机制断裂, 而回火马氏体是准解理断裂.

3 结 论

(1) 铁素体含量为 33.8% 的复相钢, 不仅有较高的强度、塑性和屈强比, 同时表现出

较好的疲劳抗力。

(2) 闭合效应对裂纹在低速区扩展有重要作用。三种复相钢中以铁素体含量为33.8%时的 K_{Cl}/K_{max} 值最高, 达0.7。

(3) 在平面应力状态下, 垂直于裂纹面方向, R_y 与 $(K_{max}/\sigma_y)^2$ 的比值 A 对三种铁素体含量的复相钢是不同的, 含量高的 A 值大。

本文为国家自然科学基金资助课题

参 考 文 献

- 1 Rashid M S. SAE Trans, 1976; 85: 938
- 2 Davies R G. Metall Trans, 1978; 7A: 41
- 3 Suzuki H, Mc Evily A J. Metall Trans, 1979; 10A: 475
- 4 Ishihara T. J Mater Sci, 1983; 18: 103
- 5 邓蓉英, 马运福. 机械强度, 1982; (1):57
- 6 邓蓉英, 周爱华等. 金属学报待发表
- 7 Dutta V B, Suresh S, Ritchie RO. Metall Trans, 1984; 15A: 1193
- 8 Gray G T, Williams J C, Thompson A W. Metall Trans, 1983; 14A: 421
- 9 Gerberich W W, Yu W, Esaklul K. Metall Trans, 1984; 15A: 875
- 10 Deng R, Yu G, Li H. Theoretical and Applied Fracture Mechamcs, 1987; 7: 37

FATIGUE CRACK PROPAGATION AND CLOSURE EFFECT IN FERRITE-MARTENSITE DUAL-PHASE STEEL

DENG Rongying, YE Zhijun (Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing); LIU Shuhua ZOU Dingqiang (China Academy of Railway Sciences, Beijing)

(Manuscript received 27 March, 1989; revised manuscript 17 July, 1989)

ABSTRACT The effect of ferrite content in ferrite-martensite dual-phase steel on the initiation and propagation of fatigue crack and the plastic deformation at crack tip has been studied. In a range of ferrite content from 24.2 to 41.5%, the optimum seems to be 33.8%, of which the crack initiation will be prolonged, the threshold value increased, the propagation rate decreased and the closure stress intensity factor increased. As the propagation force is described by effective stress intensity factor, three steels with various ferrite contents will show the same propagation behaviour on da/dN vs ΔK_{eff} curve. It is shown that the closure effect increases with the decrease in ΔK at the fatigue crack tip. When ΔK equals to ΔK_{th} , the closure effect reaches a maximum value of 0.7 in a dual-phase steel with 33.8% ferrite.

KEY WORDS dual-phase steel, fatigue crack, closure effect

Correspondent: DENG Rongying, Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080