

裂纹在珠光体钢中的近门槛区扩展

邓蓉英 周爱华 蒋怀庆 李春秀 张立卿 孙宇田[†]

(中国科学院力学研究所)

摘要 在不同应力比(R)条件下研究珠光体片层距(d)对疲劳裂纹近门槛区扩展的影响,测定了材料闭合应力强度因子(K_{c1})和门槛值(ΔK_{th})以及在门槛区扩展时裂纹尖端张开位移范围(ΔCOD)。

关键词 珠光体钢, 裂纹扩展, 疲劳

以往的研究结果^[1-4]表明,珠光体中铁素体和渗碳体的片层距是决定珠光体性能的重要因素。常规力学性能因 d 的不同而各异。本文企图探索 d 对裂纹起始扩展的 ΔK_{th} 和 K_{c1} 值的影响以及在不同 R 下 d 对这些参数的影响。

另外裂纹是在尖端的一张一闭反复作用下向前扩展的。文献[5]也曾指出在低 R 范围内,裂纹尖端 $K_{c1} > K_{min}$, $K_{max} - K_{c1} = \Delta K_{th,0}$,只有 $\Delta K_{th,0}$ 这部分应力强度因子对裂纹扩展起作用,且 $\Delta K_{th,0}$ 与 R 无关。在线弹性断裂力学条件下,裂纹尖端的 ΔK 与 COD 有关。因此,本试验还试图探索裂纹起扩时裂纹尖端张开位移的规律,应用光学显微镜和扫描电镜分别观察裂纹扩展路径与断口形貌。

1 试验方法

采用T₈钢,分别在700, 650和600℃进行等温退火处理,得到 d 为0.77, 0.5和0.31 μm 三种珠光体,分别以I, II和III表示。其常规机械性能列于表1。

表1 T₈钢等温退火的机械性能
Table 1 Mechanical properties of annealed Steel

Sample No.	E GPa	σ_s MPa	σ_b MPa	$\delta, \%$	$\psi, \%$
I	184.1	275.7	742.5	12.0	13.7
II	169.4	286.7	755.2	16.8	14.5
III	162.0	309.0	775.0	16.5	17.1

疲劳裂纹扩展试验采用三点弯曲试样,在2t Amsler高频试验机上进行。加载频率为93 Hz,分别在 R 为0.15, 0.3, 0.5, 0.65和0.75条件下测定。并用30 \times 读数显微镜测量裂纹长度。

当载荷循环 2×10^6 次,裂纹长度增量 $\Delta a \leq 0.1\text{mm}$ (即 $da/dN \leq 5 \times 10^{-11}\text{m/cyc}$)时裂纹尖端对应的 ΔK 定义为裂纹起扩的门槛值 ΔK_{th} 。用载荷递减法得到。

[†]北京工程学院毕业生。

1988年3月19日收到初稿;1988年9月12日收到修改稿。

本文通讯联系人:邓蓉英,副研究员,北京中国科学院力学研究所

裂纹尖端的 K_{c1} 和 COD 在 10t MTS 机上测定。测量前在试样前、后表面（与 Z 轴垂直的面）裂纹尖端处分别粘贴两个应变片（ $0.5 \times 0.5 \text{ mm}$ ），其中一片与加载方向平行，另一片则与加载方向垂直。从 $p-e$ 曲线上非线性开始的载荷即为裂纹闭合载荷，根据此载荷、裂纹长度和含裂纹体的几何参数可计算出裂纹尖端的 K_{c1} 值。采用裂纹尖端张开位移的标准测试方法分别测得裂纹在 K_{c1} 和 $K_{n,max}$ 的 COD 值（ COD_{c1} 和 $COD_{n,max}$ ），在循环载荷作用下裂纹尖端的 $\Delta COD = COD_{n,max} - COD_{c1}$ 。

裂纹扩展的金相观察试样的制备见文献[6]，用 Polyvar-MET 金相显微镜进行裂纹扩展路径和塑性区观察，用 S-570 电镜观察断口。

2 试验结果与分析

2.1 疲劳裂纹近门槛区扩展

将同一组 $d(I)$ 的试样，在不同 R 条件下进行近门槛区裂纹扩展试验，结果见图 1。结果表明近门槛区的扩展，其 da/dN 受 R 的影响较大，随 R 增加而增加，在低应力比范围内影响更为明显。从数组 $da/dN - \Delta K$ 曲线中还看到 R 的影响随着裂纹尖端 ΔK 增加而减小，曲线渐趋重合。 R 越高重合的 ΔK 越低。

用载荷递减法测定不同 R 和 d 的 ΔK_{th} 值。当珠光体 d 相同时 R 的增加使 ΔK_{th} 值明显下降。当 $R > 0.5$ 以后其影响甚小，在 0.65 和 0.75 时其值相差极小而趋于同一水平。图 2 曲线 1 的 $\Delta K_{th} - R$ 曲线上出现了转折点，用作图法得转折发生在 $R = 0.58$ 和 $\Delta K_{th} =$

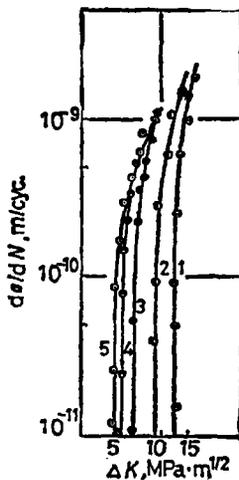


图 1 da/dN 与 ΔK 关系

Fig. 1 da/dN vs ΔK

1— $R=0.15$, 2— 0.3 , 3— 0.5 , 4— 0.65 , 5— 0.75

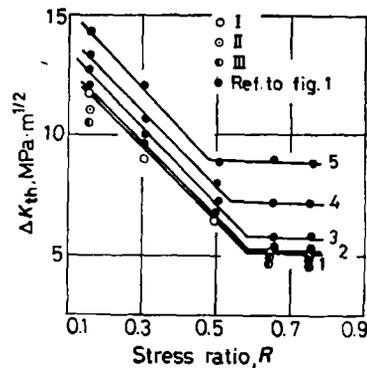


图 2 不同 da/dN 的 $\Delta K-R$ 关系

Fig. 2 ΔK vs R for different da/dN values

1— $da/dN \leq 0.5 \times 10^{-10} \text{ m/cyc}$; 2— 1.0 ; 3— 3.0 ;
4— 6.0 ; 5— 10.0

$5.44 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 处，该曲线是在 $da/dN \leq 5 \times 10^{-11} \text{ m/cyc}$ 时得到的。可近似地看作为等 da/dN 值下的 $\Delta K-R$ 曲线。

根据文献[5]得知转折点处的 R ，其裂纹尖端的 K_{min} 是等于裂纹的固有 K_{c1} ，将该 R 记为 R_{c1} ，对应的 ΔK_{th} 记为 $\Delta K_{th,0}$ ，则

表 2 T₈钢的闭合应力强度因子
Table 2 Closure stress intensity factors of T₈ steel

Sample No.	da/dN m/cyc, ×10 ⁻¹⁰	R _{c1}	K _{c1} , MPam ^{1/2}	
			Calculated	Observed
I-16	10.0	0.470	7.96	7.28
I-19	6.0	0.530	8.02	7.25
II-13	3.0	0.570	7.77	7.65
II-15	1.0	0.575	7.31	7.09
III-7	0.50	0.580	7.50	7.46
III-15*				5.11

* Two strain foils are not perpendicular each other

$$R_{c1} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} = \frac{K_{c1}}{K_{\max}} \quad (1)$$

因在斜直线段上, $K_{\max} = \Delta K_{th,0} / (1 - R_{c1})$

$$R_{c1} = \frac{R_{c1}(1 - R_{c1})}{\Delta K_{th,0}} \quad (2)$$

$$K_{c1} = \frac{R_{c1} \cdot \Delta K_{th,0}}{1 - R_{c1}} \quad (3)$$

将得到的 R_{c1} 和 $\Delta K_{th,0}$ 值代入 (3) 式, 可计算出 K_{c1} 为 $7.5 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. 如将图 2 中不同 R 的 $da/dN - \Delta K$ 曲线转变为不同等 da/dN 的 $\Delta K - R$ 曲线 (图 3 曲线 2—5). 同样曲线上都有转折点出现. 将每对 $(R_{c1}, \Delta K_{th,0})$ 代入 (3) 式, 则可得每一个等扩展速率下的 K_{c1} , 将结果列于表 2.

在这样低应力强度条件下的裂纹尖端的闭合效应, 并不是在高应力强度下由裂纹扩展过程中裂纹尖端塑性变形所引起^[7], 即不是塑性诱发闭合 (Plasticity-induced closure), 而是材料固有性质的一种反映.

2.2 裂纹尖端的 K_{c1} 和 COD 测量

根据前述方法对三组 d 的材料测量了裂纹尖端的闭合载荷, 为便于对比将实测和计算结果一并列于表 3. 表中数据表明实测和计算结果符合较好. 同时三组材料的结果亦相差极小. 因而可以认为 d 对材料固有的 K_{c1} 没有影响. 材料的 K_{c1} 可由 $\Delta K - R$ 关系计算得到.

表 3 三组不同片层距珠光体钢裂纹张开位移
Table 3 Crack opening displacement (COD) of pearlitic steel for three interlamellar spacings

Sample No.	(COD) _{c1} , mm	(COD) _{max} , mm	ΔCOD, mm
I-16	0.0065	0.0172	0.0107
I-19	0.0079	0.0193	0.0114
II-13	0.0137	0.0266	0.0129
II-15	0.0151	0.0262	0.0111
III-7	0.0061	0.0174	0.0113
III-15*	0.0208	0.0062	0.0146

* Two strain foils are not perpendicular each other

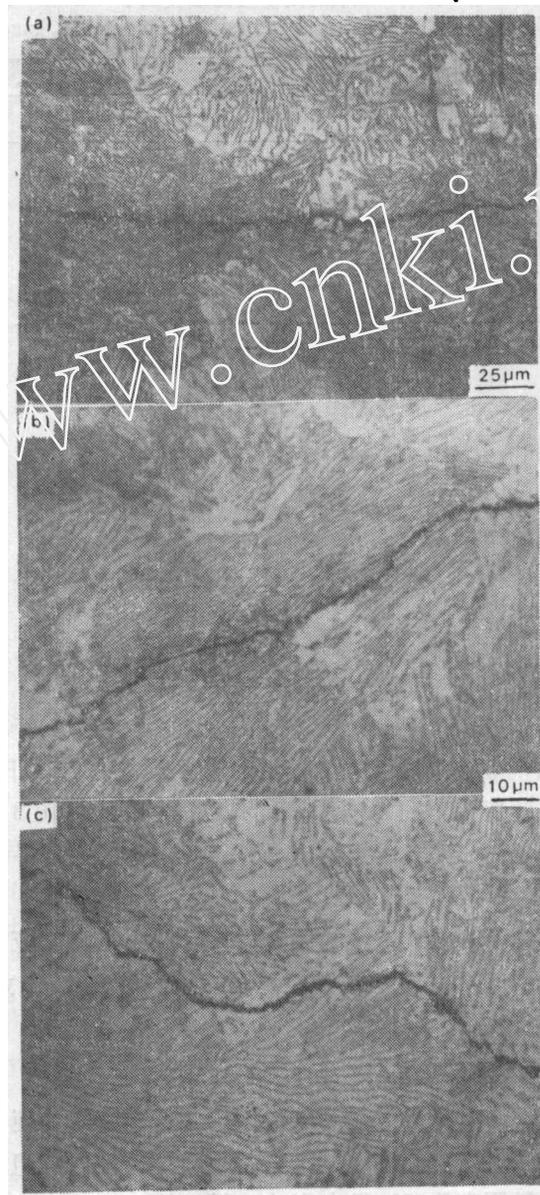


图 3 裂纹扩展路径

Fig. 3 Crack propagation path, (a) $\Delta K=14.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,
 (b) $\Delta K=11.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, along ferrite lamellar colonies,
 (c) $\Delta K=11.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, along boundary of pearlite

用线弹性断裂力学测试 COD 方法, 测定了 ΔK_{th} 中 $K_{c1}-K_{max}$ 间裂纹张开位移变化范围 ΔCOD , 其结果见表 3. 可以看出, 裂纹若要在载荷反复作用下扩展, 裂纹尖端必须张开. 前面已指出, 在 $R < R_{c1}$ 范围内, 只有 $K_{max} - K_{c1} = \Delta K_{th,0}$, 裂纹尖端才能张开, 并促使裂纹向前扩展. 在此 R 范围内, K_{max} 保持不变, 则裂纹尖端的张开位移也不变, $(COD)_{max} - (COD)_{c1} = \Delta COD$ 为一定值. 另外, 在 $R > R_{c1}$ 时, ΔK_{th} 保持常数即裂纹尖



图 4 塑性变形区

Fig. 4 Plastic deformation zone, $da/dN < 2 \times 10^{-10}$ m/cyc

端的 K_{max} 和 K_{min} 虽然随 R 增加而增加, 但两者之差保持不变, 并 $K_{max} - K_{min} = \Delta K_{th(R > R_{cl})} = \Delta K_{th,0}$, 即 $(COD)_{max} - (COD)_{min} = \Delta COD$. 从表 3 中结果得到了证实. 故要使裂纹在门槛值下缓慢起扩 ($da/dN \leq 5 \times 10^{-11}$ m/cyc) 裂纹尖端必须张开位移变化值达到一临界值.

由图 2 具有不同 da/dN 值的 $\Delta K-R$ 曲线所得到的 K_{c1} 是相等的, 但裂纹尖端的 K_{max} 不同, K_{max} 随 da/dN 提高而增加, 所以 ΔCOD 值增大, 裂纹在近门槛区扩展. 无论 R 如何, 只要裂纹尖端 ΔCOD 值相同, 裂纹就以相等的 da/dN 扩展, 显然 ΔCOD 值大的 da/dN 值就大. 具有不同 d 值的三组材料的 ΔCOD 值的差别在误差范围内, 说明 d 对 da/dN 值的影响甚小.

2.3 裂纹扩展路径和塑性区的金相观察

在光学显微镜下对裂纹扩展连续观察表明, 裂纹在高应力强度因子范围内, 扩展路径与珠光体片层取向无关, 无论珠光体团粒取向如何, 扩展总是保持与外力呈垂直的方向, 且裂纹面较平直 (图 3a). 而在近门槛区的低速扩展, 扩展路径有较高的选择性, 总是顺着珠光体中的铁素体片向前扩展 (图 3b) 或沿珠光体团粒间界向前扩展 (图 3c). 故裂纹扩展路径曲折, 断裂面粗糙不平.

在低速区裂纹尖端的塑性变形对珠光体团粒取向敏感. 裂纹两侧塑性变形不连续和不对称. 塑性区内显示了珠光体片层花样 (未腐蚀). 由于塑性变形只在珠光体中的铁素体片发生, 故变形铁素体和未变形的渗碳体片呈现珠光体片层花样, 如图 4.

对裂纹近门槛区扩展, 由于尖端粗糙的断裂面诱发闭合 (Roughness induced closure) 起着重要作用, 故本试验观察到在低速下的裂纹扩展的断裂面粗糙不平. 粗糙的程度与珠光体团粒尺寸和取向有关. 试验中三组 d 值的珠光体团粒尺寸无明显差别, 因而三组材料的固有闭合应力强度因子基本一致.

2.4 断口扫描电镜观察

扫描电镜观察表明, 疲劳裂纹近门槛区扩展时, 断口表面呈现出珠光体片层花样 (图 5a). 且在片层上有细的与局部扩展方向呈垂直的平行条纹 (图 5b). 渗碳体自身硬而脆几乎无塑性变形能力, 由于铁素体的不断滑移在两相界面间产生高度应力集中致使渗碳体以解

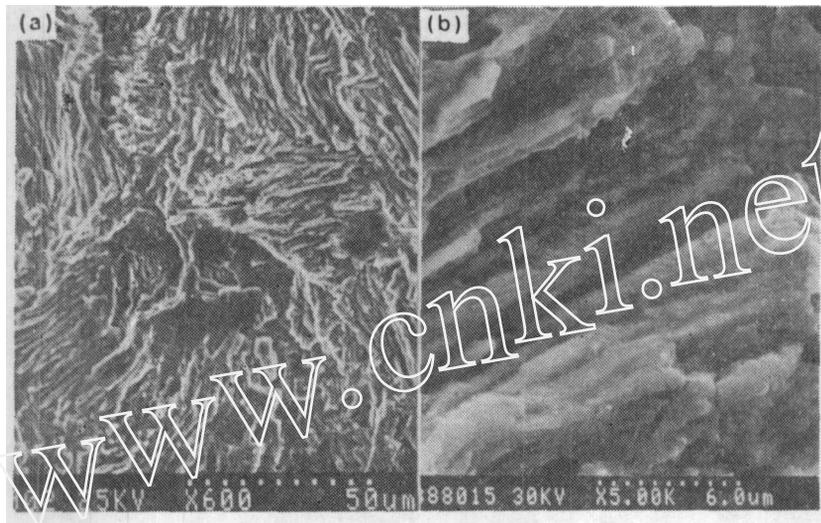


图 5 珠光体形貌(a)和铁素体片层的平行条纹(b)
Fig. 5 Pearlite topographic feature(a) and striation on ferrite lamellar (b)

理方式开裂。片层上的条纹说明铁素体是以钝化复锐的机制扩展的。

由于在近门槛区 ΔK 低, 裂纹只可能在某些应力集中和较薄弱的相界面处萌生, 先形成许多微裂纹, 然后这些裂纹在各自的层次上沿界面向前扩展, 不同层次的裂纹在其扩展的过程中以撕裂方式相连接, 故台阶处有塑性变形的痕迹。

3 结 论

(1) 相同 d 的珠光体钢近门槛区的扩展受 R 影响大, R 低的 ΔK_{th} 值高而 da/dN 低, 但 d 对这些参数影响甚小, 只是在 $R=0.15$ 时显示一定的影响, d 越小的 ΔK_{th} 值越低, 而在 $R=0.75$ 时基本无影响。

(2) 由等速的 $\Delta K-R$ 曲线计算得到的 K_{c1} 与实测结果符合较好。

(3) 裂纹只有当尖端的 ΔCOD 值达到一定值时才能起扩, ΔCOD 值相同裂纹就以相同的速率扩展。

(4) 裂纹在近门槛区的扩展路径对显微组织极为敏感, 一般总是沿着珠光体团粒间界和顺着珠光体中的铁素体片向前扩展。

本文为国家自然科学基金资助项目。

参 考 文 献

- 1 Miller L E, Smith G C. *J Iron Steel Inst*, 1970; 228: 998
- 2 Rosenfield A R, Hahn G T, Embury J D. *Metall Trans*, 1972; 3: 2797
- 3 Porter D A, Easterling K E, Smith G D W. *Acta Metall*, 1978; 26: 1405
- 4 Vosikovskiy O. *Eng Fract Mech*, 1979; 11: 595
- 5 邓蓉英, 马远福, 机械强度, 1982; 1: 22
- 6 邓蓉英, 李 禾, 于桂清. *金属学报*, 1984; 20: A76
- 7 Elber W. *ASTM STP* 486, 1971: 230

FATIGUE CRACK PROPAGATION NEAR THRESHOLD IN PEARLITIC STEEL

DENG Rongying, ZHOU Aihua, JIANG Huaiqing, LI Chunxiu,
ZHANG Liqing, SUN Yutian (*Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing*)
(Manuscript received 19 March, 1988; revised manuscript
12 September, 1988)

ABSTRACT The effect of pearlite interlamellar spacing of steel T₈ on fatigue crack propagation near threshold has been investigated at different stress ratios. The closure intensity factor, threshold value and crack tip opening displacement range were measured.

KEY WORDS pearlitic steel, crack propagation, fatigue

Correspondent: DENG Rongying, Associate Professor, Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing