

航空用超高强度钢疲劳裂纹表面长度与内部长度之间的关系

王苗苗¹, 曾燕屏¹, 王习术², 谢锡善¹

(1. 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要: 采用扫描电镜原位观测的方法, 跟踪观察了低周疲劳载荷作用下超高强度钢中 AN 夹杂导致裂纹萌生与扩展的微观行为, 得到了材料疲劳裂纹表面长度与内部长度之间的关系, 可以根据实际检测到的材料或者结构疲劳裂纹表面长度计算其内部长度, 并估算其剩余寿命。

关键词: 超高强度钢; 低周疲劳; 夹杂物; 裂纹萌生与扩展; 原位观测

中图分类号: TG132.32

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2009)03-0102-05

为了满足快速发展的航空工业的需要, 超高强度钢的研制与开发不断取得新的进展。然而随着强度级别的提高, 其对缺陷的敏感性也显著增大。作为钢中不可避免的缺陷, 非金属夹杂物必对超高强度钢性能产生不可低估的影响。大量试验结果^[1~5]表明: 夹杂物是疲劳裂纹的主要萌生源之一, 加速了钢的破坏。

相对于材料疲劳寿命的估算^[6,7]而言, 人们更关心的是其剩余寿命的估算。目前人们均用疲劳裂纹内部长度来估算材料的剩余寿命, 但疲劳裂纹内部长度在材料内部, 难以通过实际测量得到, 而疲劳裂纹表面长度却可以从表面直接测量出; 如果能找到二者之间的关系, 那么就可以通过疲劳裂纹表面长度来计算其内部长度, 进而估算材料的剩余寿命。本研究采用扫描电镜原位观测的方法, 跟踪观察了低周疲劳载荷作用下超高强度钢中 AN 夹杂导致裂纹萌生、扩展乃至断裂的全过程, 得到了材料疲劳裂纹表面长度与内部长度之间的关系, 这样超高强度钢的疲劳断裂分析理论中的裂纹长度参数就可以用实际测得的裂纹(表面)长度进行换算, 对定量分析材料疲劳断裂以及预测裂纹扩展速率和疲劳寿命具有十分重要的意义。

1 试验方法与材料

本研究采用 VM + Vac ESR(真空感应熔化 +

真空电渣重熔)的航空发动机轴类超高强度钢为试验材料, 其化学成分(质量分数%)为: C 0.209, Ni 14, Co 10, Cr 2.5, Mo 1.4, Al 0.9, Ti < 0.010, S 0.0005, P 0.004, O 0.0005, N 0.0013, Fe bal。主要热处理工艺为: 将材料加热至 885~912℃固溶处理 1h 后空冷至 90℃以下; 然后在 24h 内对材料进行冷处理, 即将材料降温至 -59~-87℃保温 1h 后放入空气中升温; 待温度升至室温后, 再将材料放入 190~218℃的加热炉中保温 5~8h 而后空冷至室温。最后将材料加热至 496±9℃保温 10h 后空冷至室温。

首先将大块试样线切割成 0.8mm 厚的薄片, 再将试片表面抛光, 在光学显微镜下寻找不同形状和尺寸的夹杂物, 并在试样表面标定其位置。然后采用 SEM 及 EDS 能谱分析确定其成分, 选定所需类型的夹杂物作为原位观测用夹杂物。用线切割的方法将试片切成如图 1 所示的试样, 并使所选夹杂位于试样标距中心。适当腐蚀, 使夹杂物与基体界面清晰, 便于观察。原位疲劳试验在 SS-550 型带扫描电镜的电液伺服疲劳试验机上进行, 试验温度为室温。疲劳试验采用载荷控制, 加载波形为拉-拉正弦波, 最大应力 $\sigma_{max} = 1417\text{MPa}$, 应力幅值比 $R = 0.1$, 试验时载荷频率 $f = 5\text{Hz}$, 观察时载荷频率 $f = 0.01\text{Hz}$, 图象采集均在最大拉应力下进行。

2 试验结果与讨论

2.1 夹杂物导致疲劳裂纹萌生与扩展的微观行为
本研究所用超高强度钢中的夹杂物有两种形

收稿日期: 2007-10-23; 修订日期: 2009-03-20

作者简介: 王苗苗(1981—), 女, 硕士研究生, (E-mail) wangmiao2004@163.com

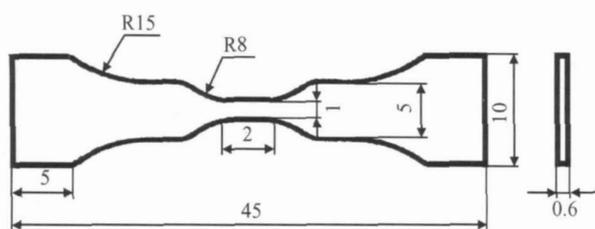


图 1 原位疲劳试验用试样的形状和尺寸 /mm

Fig 1 Shape and size of samples for SEM *in situ* fatigue tests

态,即单个和成串夹杂,且以成串夹杂居多。单个夹杂物的形状一般呈矩形或规则的多边形,如图 2a和 b所示;成串夹杂的形态则一般为点链状,其长度最大可达 140 μm ,其中大部分是尺寸较小的夹杂物,也有一些尺寸较大的矩形或多边形夹杂,如图 2c和 d所示。经 SEM 及 EDS 分析,这些夹杂主要为 AN 和少量 Al_2O_3 。AN 夹杂的弹性模量 $E = 308\text{GPa}$ 平均尺寸约为 3 μm 。已有的研究表明,成串夹杂对材料疲劳性能的危害比单个夹杂大得多,因此,下面主要研究成串夹杂导致疲劳裂纹萌生与扩展的微观行为。

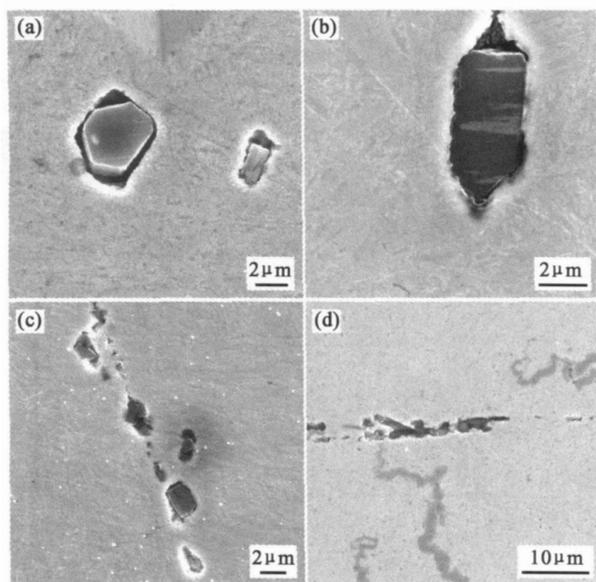


图 2 航空发动机用轴类超高强度钢中的夹杂物

Fig 2 Inclusions in ultrahigh strength steel for aircraft engine shaft

图 3 显示了一串总长度约为 88 μm 的 AN 夹杂在疲劳载荷 ($\sigma_{\max} = 1417\text{MPa}$, $R = 0.1$, $f = 5\text{Hz}$) 作用下导致裂纹萌生与扩展的微观行为。由图 3 可以看出,在疲劳载荷作用下,当循环周次 $N = 102556$ 时,在点链状夹杂中部、两夹杂之间的基体中萌生了一条小裂纹,如图 3b 中箭头所示。随着循环周次的增

加,该裂纹向点链状夹杂两侧扩展,裂纹所到之处,要么夹杂物与基体界面脱粘,要么夹杂物自身开裂。当循环周次 $N = 107645$ 时,裂纹贯穿夹杂右侧,如图 3c 所示。循环周次继续增加,裂纹开始向点链状夹杂两侧的基体扩展,当循环周次 $N = 112665$ 时,裂纹扩展进入右侧基体,如图 3d 中箭头所示。当 $N = 115659$ 时,裂纹扩展进入左侧基体,如图 3e 中箭头所示。此后随循环周次的增加,裂纹不断向两侧基体扩展,裂纹长度不断增加,开口度也不断增大,当循环周次 $N = 126792$ 时,裂纹总长度达 165 μm ,如图 3f 所示。当 $N = 132558$ 时,裂纹总长度达 453 μm ,如图 3g 所示。当 $N = 132996$ 时,裂纹已扩展至试样的左边缘,此时裂纹的总长度约为 630 μm ,裂纹两端之间的垂直距离约为 600 μm ,约为试样宽度的 60%,如图 3h 所示。这之后仅循环了 10 周次试样即断裂,试样的疲劳寿命为 133006 周次。

图 4 为图 3 所示试样的断口形貌,可以看出,裂纹源正是我们所跟踪观察的成串夹杂物。在断口上,它也是由一长串嵌入基体中的小夹杂组成,其长度约为 71 μm ,宽度约为 4 μm 。

我们还跟踪观察了另外几个含成串夹杂物的试样在疲劳载荷作用下裂纹萌生和扩展的微观行为,总体来看,在疲劳载荷作用下,随着循环次数的增加,裂纹总是在点链状夹杂内部两夹杂之间的基体中萌生,然后向两侧扩展,裂纹所到之处,要么夹杂物与基体界面脱粘,要么夹杂物自身开裂,直至裂纹贯穿整个点链状夹杂,而后缓慢向两侧基体扩展。当裂纹扩展到边界时,试样断裂。大多数情况下一个试样中只萌生一条裂纹,但也有一个试样中萌生了两条裂纹的情况,此时较易扩展的裂纹将成为导致试样断裂的主裂纹,并导致试样最终断裂。

对上述试样断口进行分析,可以发现疲劳裂纹最大表面长度和内部长度(如图 5 所示)与试样断口的长和宽之间存在着一定的关系,且随点链状夹杂长轴方向与疲劳裂纹表面长度方向的夹角不同有所不同,如表 1 所示。当点链状夹杂的长轴垂直于疲劳裂纹表面长度方向时,疲劳裂纹最大表面长度与断口长之比在 0.4~0.5 之间,疲劳裂纹最大内部长度与断口宽之比也在 0.4~0.5 之间,椭圆形裂纹源的面积与断口的面积之比在 0.1~0.2 之间;而当点链状夹杂的长轴平行于疲劳裂纹表面长度方向时,疲劳裂纹最大表面长度与断口长之比在 0.5~0.6 之间,疲劳裂纹最大内部长度与断口宽之比也在 0.5~0.6 之间,椭圆形裂纹源的面积与断口的面

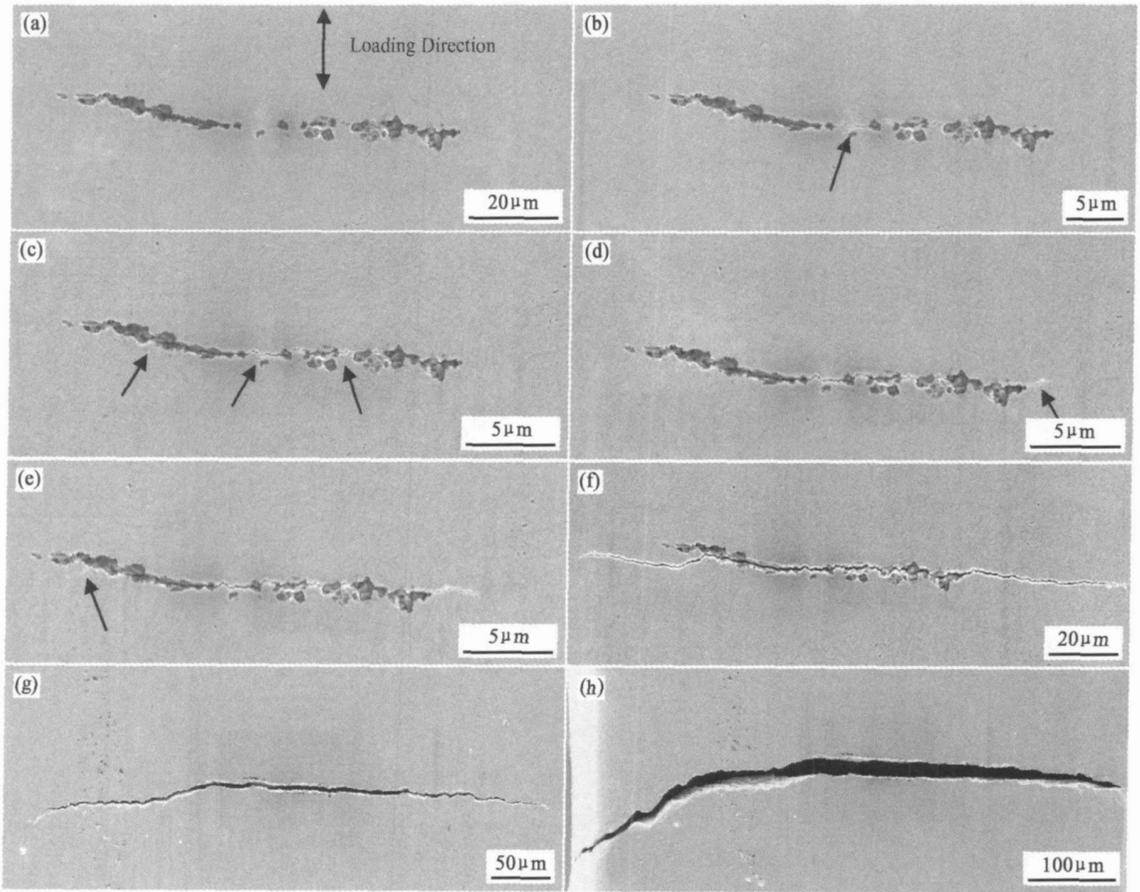


图 3 低周疲劳载荷作用下夹杂物导致裂纹萌生及扩展的微观行为
 Fig. 3 Initiation and propagation of crack induced by inclusion under fatigue load

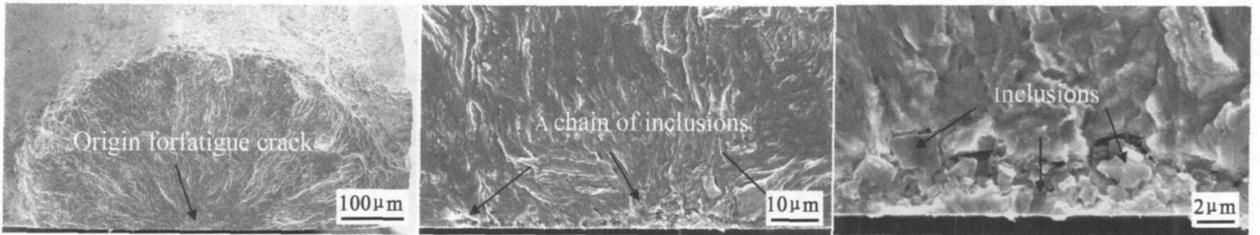


图 4 图 3 所示试样的断口形貌
 Fig. 4 Fractography of the sample shown in Fig. 3

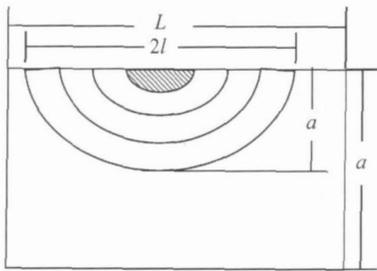


图 5 疲劳断口上裂纹扩展示意图

Fig 5 Schematic of crack growth on fatigue fractography
 $2l$ — 疲劳裂纹最大表面长度; a — 疲劳裂纹最大内部长度
 $2l$ — maximum surface length of fatigue crack
 a — maximum inside length of fatigue crack

积之比在 0.2~0.3 之间。

2.2 疲劳裂纹表面长度与内部长度之间的关系

在疲劳试验中人们最关心的是材料的疲劳寿命。相对于材料疲劳寿命的估算而言,人们更关心的是其剩余寿命的估算。目前人们均用疲劳裂纹内部长度来估算材料的剩余寿命,但疲劳裂纹内部长度在材料内部,难以通过实际测量得到,而疲劳裂纹表面长度却可以从表面直接测量出;如果能找到二者之间的关系,那么就可以通过疲劳裂纹表面长度来计算其内部长度,进而估算材料的剩余寿命。

表 2 给出了在图 4 所示断口上测得的疲劳裂纹

表 1 疲劳裂纹最大长度与断口尺寸之间的关系

Table 1 Relationship between the maximum length of fatigue crack and the size of fractography

Specimen No	Length of fractography $L/\mu\text{m}$	Width of fractography $A/\mu\text{m}$	Area of fractography $S/\mu\text{m}^2$	$2l_{\text{max}}/\mu\text{m}$	$2l_{\text{max}}/L$	$a_{\text{max}}/\mu\text{m}$	a_{max}/A	Area of origin for fatigue crack $s/S/\mu\text{m}^2$	Angle between the long axis of a chain of inclusions and the surface of specimen ($^\circ$)
1	900	700	630000	450	0.5	303	0.43	107209	90
2	1000	600	600000	500	0.5	270	0.45	113850	90
3	980	600	588000	430	0.44	260	0.43	82697	90
4	1000	700	700000	525	0.53	348	0.50	146680	45
5	1100	600	660000	630	0.57	337	0.56	173648	0
6	1000	640	640000	570	0.57	323	0.5	115061	0
7	900	440	396000	531	0.59	267	0.61	116847	0
8	900	600	540000	540	0.6	310	0.52	125368	0

表面长度 $2l$ 与内部长度 a 。根据表 2 中的数据可作出图 6 所示的疲劳裂纹内部长度与表面长度之间的关系图, 可以看出, 二者的线性关系明显, 可用下式表示:

$$a = A + B \times 2l = -60.79 + 0.65 \times 2l \quad (1)$$

表 2 在图 4 所示断口上测得的疲劳裂纹表面长度 $2l$ 与内部长度 $a/\mu\text{m}$

Table 2 Surface length $2l$ and inside length a of fatigue crack on fractography shown in Fig 4

Crack No.	1	2	3	4	5
$2l$	522.51	420.00	301.25	272.50	160.00
a	291.25	208.20	128.82	105.03	58.21

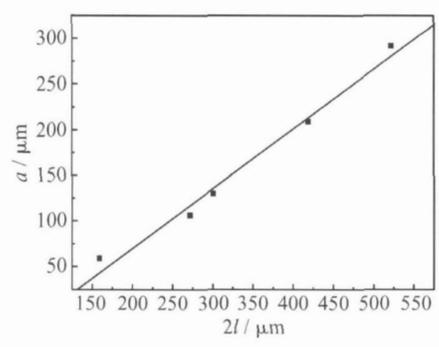


图 6 图 4 所示断口上疲劳裂纹内部长度 a 和表面长度 $2l$ 之间的关系

Fig. 6 Relationship between the inside length a and the surface length $2l$ of fatigue crack on fractography shown in Fig. 4

我们也在其它几个试样的断口上测量了疲劳裂纹表面长度与内部长度, 发现两者具有类似的线性关

系, 并且 $a - 2l$ 线性公式的斜率均在 0.5~0.7 之间。

表 3 给出了在试样断口上测得的疲劳裂纹最大表面长度与最大内部长度。根据表 3 中的数据可作出图 7 所示的疲劳裂纹最大表面长度与最大内部长度之间的关系图, 从图中可以看到, 二者的线性关系也很明显, 可以用下式表示:

$$a = A + B \times 2l = 131.58 + 0.31 \times 2l \quad (2)$$

表 3 在不同试样断口上测得的疲劳裂纹最大表面长度与最大内部长度 μm

Table 3 Maximum surface length and inside length of fatigue crack on fractography of different sample

Specimen No.	1	2	3	4	5
$2l$	648.65	630.64	534.46	522.51	434.43
a	336.66	325.66	299.17	291.25	268.40

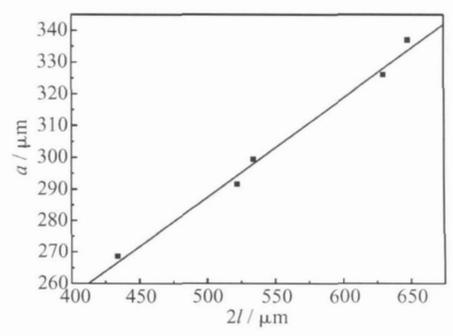


图 7 疲劳裂纹最大内部长度 a 和最大表面长度 $2l$ 之间的关系

Fig 7 Relationship between the maximum inside length a and the maximum surface length $2l$ of fatigue crack

由此可见,对于同一种材料,疲劳裂纹表面长度与内部长度之间确实存在着一定的关系,通过测量疲劳裂纹表面长度来计算其内部长度,从而估算出材料的剩余寿命是完全可能的。

4 结论

(1)所用超高强度钢中的夹杂物多为点链状的 A N 夹杂,其长度最大可达 $140\mu\text{m}$,在疲劳载荷作用下,裂纹总是在点链状夹杂内部两夹杂之间的基体中萌生,然后向两侧扩展,裂纹所到之处要么夹杂物与基体界面脱粘,要么夹杂物自身开裂,直至裂纹贯穿整个点链状夹杂,而后缓慢向两侧基体扩展,当裂纹扩展到试样边界时,试样断裂。

(2)疲劳裂纹最大表面长度 $2l$ 和最大内部长度 a 与试样断口的长 L 和宽 A 之间存在着一定的关系,且随点链状夹杂长轴方向与疲劳裂纹表面长度方向的夹角不同有所不同。当点链状夹杂的长轴垂直于疲劳裂纹表面长度方向时, $2l_{\text{max}}/L$ 和 a_{max}/A 的值均在 $0.4\sim 0.5$ 之间, s/S 的值在 $0.1\sim 0.2$ 之间;当点链状夹杂的长轴平行于疲劳裂纹表面长度方向时, $2l_{\text{max}}/L$ 和 a_{max}/A 的值均在 $0.5\sim 0.6$ 之间, s/S 的值在 $0.2\sim 0.3$ 之间。

(3)所用超高强度钢的疲劳微裂纹表面长度与

内部长度之间存在非常明显的线性关系,并且 $a\sim 2l$ 线性公式的斜率均在 $0.5\sim 0.7$ 之间。

参考文献:

- [1] 王习木,梁锋,曾燕屏,等. 夹杂物对超高强度钢低周疲劳裂纹萌生及扩展影响的原位观测 [J]. 金属学报, 2005, 12: 1272-1276
- [2] YUKITAKA Munakani. Metal fatigue effects of small defects and nonmetallic inclusions[M]. Amsterdam: Elsevier, 2002
- [3] 曾燕屏,董建新,张麦仓,等. 拉伸载荷下镍基粉末高温合金中夹杂物行为 [J]. 科技大学学报, 2005, 27(2): 202-204
- [4] 李守新. 夹杂对高强钢疲劳性能影响的研究 [J]. 中国基础科学, 2005, 7(4): 14-15
- [5] WANG Xirshu, ZHANG Lina, ZENG Yanping et al. SEM in-situ investigation on fatigue cracking behavior of PM Rene95 alloy with surface inclusions[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 13(3): 244-249
- [6] 冯西桥,何树延. 表面裂纹疲劳扩展的一种损伤力学方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(5): 78-82
- [7] 赵勇铭,宋迎东. 夹杂对粉末高温合金裂纹扩展寿命的影响 [J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 772-777

Relationship between Surface Length and Inside Length of Fatigue Crack in Ultra-high Strength Steel

WANG Miaomiao¹, ZENG Yanping¹, WANG Xirshu², XIE Xirshan¹

(1. School of Material Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Ultra-high strength steel makes advancement incessantly with development of aeronautical industry. However, its sensitivity to the flaw increases with increasing in strength level. Nonmetallic inclusion as one of the inevitable flaws must influence the performance, especially fatigue performance, of ultra-high strength steel. *In-situ* fatigue tests with special designed SEM have been conducted to trace the whole process of crack initiation and propagation induced by A N inclusion in ultra-high strength steel under low-cycle fatigue load. The strong linear between the surface length and the inside length of fatigue crack was gained. The inside length can be calculated based on the surface length of fatigue crack detected in material or structure and the residual life can be estimated.

Key words ultra-high strength steel; low-cycle fatigue; inclusions; crack initiation and propagation; *in-situ* observation