

# 马氏体不锈钢疲劳断裂性能的研究

涂柏林 张学铎 商锡珍 杨景成 刘林珍

## 一、前言

叶片材料在使用中发生疲劳性能变化后,可用其使用性能指标之一——剩余疲劳强度进行定量评定,近年来在我国航空材料应用研究、工艺研究、延寿及故障分析等方面获得了日益广泛的应用。本文对近年来马氏体不锈钢叶片材料剩余疲劳强度在工程应用实践中发现的一些规律,用断裂力学方法进行实验分析,探索马氏体不锈钢叶片材料良好使用性能与强度、塑性恰当配合的关系,并提出理论依据。

## 二、试验材料的热处理和断裂韧性 $K_{IC}$ (J)\*

1Cr12Ni2WMoVNb、1Cr11Ni2W2MoV两种不锈钢化学成分及不同回火温度的机械性能见本刊1979年第4期第14页。 $K_{IC}$ (J)与回火温度的关系见图1。

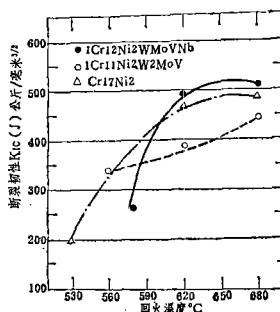


图1 两种不锈钢 $K_{IC}$  (J)与回火温度的关系

## 三、试验方法

疲劳断裂都是裂纹起始与扩展的结果,宏观观察总寿命 $N_f$ 由裂纹起始期 $N_i$ 及裂纹扩展期 $N_p$ 两部分组成。

$$N_f = N_i + \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{\frac{da}{dN}} da \quad (1)$$

\*按《利用 $J_R$ 阻力曲线确定金属材料延性断裂韧度的试验方法》(GB2038—80)测定的。

\*

\*

\*

\*

\*

a—每个试验点的裂纹长度

N—每个试验点的载荷循环数

DELTA K—每个试验点的应力强度因子范围

dAdN—每个试验点的裂纹扩展速率

C.C—七点递增多项式回归时的相关系数

Z6—准线弹性判据

4) 打印排队后的DELTA K, dAdN,

5) 打印拟合结果

高周公式  $D', \gamma, r, VF.$

低周公式  $D'', \gamma, r, VF.$

Paris公式  $C, M, r, VF.$

6) 打印寿命估算结果

$A_1$ —裂纹尺寸,  $A_2$ —裂纹尺寸,

REAL—实测寿命平均值,

EST—估算寿命平均值,  $\delta$ —相对误差

LN—每个试样各实验点的估算寿命值。

注:循环J积分的程序基本上与上述相同,只须

将 $\Delta J$ 代替 $\Delta K$ ,输入数据中增加输入总变形功 $A_T$ ,弹性变形功 $A_e$ 及 $dp, \Delta \delta$ 三项即可。

## 3. 源程序

(见621所内部资料:高温低周疲劳裂纹扩展速率实验数据处理及其计算机程序)。

(参考文献略)

式中  $a_0$ —裂纹起始长度;

$a$  —临界裂纹长度。

### 1. 裂纹起始期 $N_i$ 值的测定

1) 试样形状 见图 2, 根据一般叶片几何形状和尺寸, 用板状单边尖锐缺口试样, 缺口用  $\phi 0.12$  钼丝进行线切割, 类似不锈钢叶片在使用中由于高速气流冲刷和腐蚀而形成的斑坑。

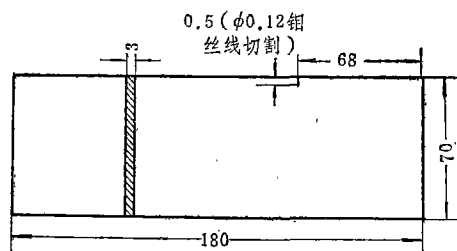


图 2 试样形状和尺寸

2) 起始裂纹长度  $a_0$  的确定, 根据大修发动机分解检查叶片裂纹的分辨率, 一般在 0.2 至 0.5 毫米以上, 因此, 暂定  $a_0 = 0.2$  毫米, 产生 0.2 毫米裂纹长度的循环数定义为  $N_i$ 。

### 2. 疲劳裂纹亚临界扩展速率 $da/dN$ 的测定

1) 试样和试验参数 试样用图 2 所示型式。循环应力状态和频率接近某型发动机 1Cr11Ni2W2MoV 叶片的实际服役条件。应力比  $R = -1$ 、 $\Delta\sigma = 18.6$  公斤/毫米<sup>2</sup>、 $f = 140$  Hz 正弦波等幅、 $a_0 = 0.2$  毫米及  $a_c = 20$  毫米 (统计过数十片同类型 Cr17Ni2 故障裂纹叶片, 裂纹扩展极限尺寸多数为 18~20 毫米); 在 3.5% NaCl 介质环境中, 用梁式电磁振动疲劳试验机进行实验。

2) 数据处理 根据实验测得  $a-N$  数据, 用差分法求导, 算出每个裂纹长度下的  $da/dN$  及应力强度因子  $\Delta K$ 。由于试样较宽、较薄, 将裂纹扩展区域的弯曲应力近似地作为拉伸应力处理, 则应力强度因子范围

$$\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{\pi \cdot a} \cdot F(a/b) \quad (2)$$

式中  $F(a/b) = 1.12 - 0.231(a/b) +$

$$10.55(a/b)^2 - 21.72(a/b)^3 + 30.39(a/b)^4$$

试验数据用单边缺口试样疲劳裂纹扩展数据处理程序在 TQ—16 型电子计算机上进行处理。

## 四、实验结果

### 1. 裂纹起始期 $N_i$

1Cr12Ni2WMoVNb 等两种不锈钢  $N_i$  随回火温度及  $K_{Ic}$  (J) 的变化见图 3。试样尖锐缺口根部  $a_0 = 0.2$  毫米的起始裂纹形貌见图 4。

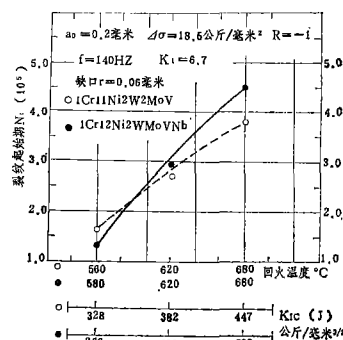


图 3 1Cr12Ni2WMoVNb、1Cr11Ni2W2MoV 钢  $N_i$  随回火温度及  $K_{Ic}$  (J) 的变化



100X

图 4 尖锐缺口根部  $a_0 = 0.2$  毫米的起始裂纹形貌

实验结果表明, 1Cr12Ni2WMoVNb 等两种不锈钢尖锐缺口 ( $K_t = 6.7$ ) 裂纹起始期  $N_i$  随回火温度的变化, 均以 680℃ 回火最高, 它与  $K_{Ic}$  (J) 随回火温度的关系, 有一致的

趋势。显然,  $N_i$  主要取决于材料的强度与塑性的恰当配合, 这与马氏体不锈钢叶片的剩余疲劳强度不单取决于材料的强度而取决于强度与塑性的恰当配合有共同之处。

## 2. 裂纹扩展速率 $da/dN$

1Cr12Ni2WMoVNb 等两种不锈钢不同回火温度与  $da/dN$  及  $K_{Ic}(J)$  的关系见图5、6。

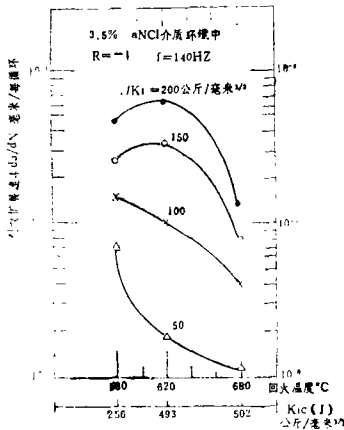


图 5 1Cr12Ni2WMoVNb 不锈钢  $da/dN$  随回火温度及  $K_{Ic}(J)$  的关系

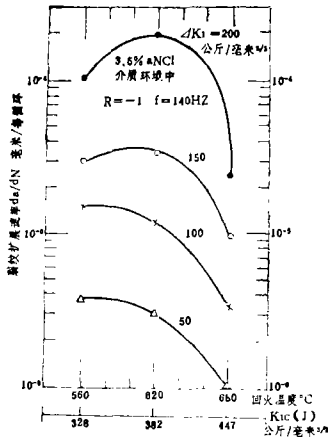


图 6 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢  $da/dN$  随回火温度及  $K_{Ic}(J)$  的关系

从图 5 和 6 可看出, 对两种不锈钢的每一  $\Delta K$  水平而言, 均以 680°C 回火的  $da/dN$  最低。在  $\Delta K$  为 100 公斤/毫米<sup>3/2</sup> 以下时, 以 560°C

或 580°C 回火温度  $da/dN$  最高。

## 五、试验结果讨论与分析

### 1. 尖锐缺口 $N_i$ 随不锈钢回火温度变化的关系

由于采用  $K_t=6.7$  的尖锐缺口试样, 它与叶片材料在使用中产生的高速气流冲刷损伤麻点或腐蚀损伤缺口近似, 这样, 将叶片材料在使用过程中发生的疲劳性能的变化 (降低), 即叶片材料的剩余疲劳强度问题, 近似地简化为实验室条件下板材试样尖锐缺口  $N_i$  疲劳寿命问题, 为叶片材料的剩余疲劳强度用线弹性断裂力学进行分析, 提供了实验依据。

#### 1) 尖锐缺口问题的断裂力学分析

裂纹形成的宏观理论表明, 在无限大平板上缺口顶端的应力, 在 I 型加载下给出 (见图 7)。

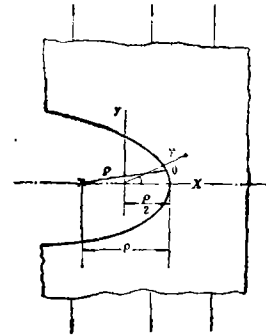


图 7 尖锐缺口顶端应力应变场分析

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi\gamma}} \frac{\rho}{2\gamma} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3)$$

式中  $\rho$ —缺口半径

当  $\theta=0$   $\gamma=\rho/2$  时, 缺口顶端处

$$\sigma_y = 2K_I / \sqrt{\pi\rho} \quad (4)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E^*} (\sigma_y) = \frac{2K_I}{E^* \sqrt{\pi\rho}} \quad (5)$$

$$E^* = \begin{cases} E & \text{平面应力} \\ \frac{E}{1-\nu^2} & \text{平面应变} \end{cases}$$

式中 $E$ —弹性模量,  $\nu$ —波桑比, 在循环应力作用下, 应力强度因子  $K_I = \Delta K_I$ , (4) 式与 (5) 式变为

$$\sigma_y = \frac{2 \Delta K_I}{\sqrt{\pi \rho}} \quad (6) \quad \varepsilon_y = \frac{2 \Delta K_I}{E^* \sqrt{\pi \rho}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta K_I &= \lim_{\rho \rightarrow 0} \sigma_y \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\pi \rho} \\ &= \lim_{\rho \rightarrow 0} \sigma_a K_t \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\pi \rho} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\sigma_a$ —外加名义应力;

$K_t$ —缺口的理论应力集中系数。

式(6)、(7)表明, 尖锐缺口顶端应力应变值大小及其宏观裂纹形成条件, 取决于  $\Delta K_I / \sqrt{\rho}$ 。(8)式表明, 缺口顶端宏观裂纹形成可用断裂力学进行处理。

## 2) 断裂韧性的贡献

实验结果表明, 在相同的  $\Delta K_I$  及  $\rho$  条件下,  $N_i$  取决于材料的断裂韧性与微观塑性对缺口顶端应力峰值  $\sigma_y$  的削减。断裂韧性一般可用于衡量一次加载时对裂纹快速扩展的抗力。虽然裂纹在一次加载时的扩展与裂纹在疲劳载荷下扩展存在本质差别, 但在高度应力(应变)集中情况下, 断裂韧性  $K_{Ic}$  对尖锐缺口疲劳抗力及裂纹扩展抗力同样显示出重大影响。

尺寸因子  $(K_{Ic}/\sigma_s)^2$  是反映裂纹尖端塑性区大小的一个重要指标, 可作为材料对裂纹敏感性的一种量度, 对 1Cr12Ni2WMoVNb

钢 680°C 回火  $(K_{Ic}(J)/\sigma_s)^2 = 31.7$ , 580°C 回火  $(K_{Ic}(J)/\sigma_s)^2 = 6.1$ , 两者差五倍之多。因而 680°C 回火试样缺口顶端的微观塑性, 有较强的松弛应力峰值  $\sigma_y$  的能力, 使微观的  $da/dN$  减缓, 使  $N_i$  值增加。

研究结果表明, 中碳钢的马氏体形态(位错马氏体及混合马氏体)与疲劳裂纹起始及扩展的关系, 与本文实验结果是一致的, 即  $K_{Ic}$  高者(位错马氏体)  $N_i$  高,  $K_{Ic}$  低者(混合马氏体)  $N_i$  低。可见 1Cr12Ni2WMoVNb 钢  $N_i$  与回火温度的关系这一实验结果, 具有一定的普遍意义。

这样, 用断裂力学分析方法, 说明“剩余疲劳强度与不锈钢回火温度的关系”, 有了一定的理论依据, 并得到了用  $K_t = 6.7$  的尖锐缺口试样  $N_i$  实验的验证。

## 3) 试样形状 $K_t$ 的重要影响

1Cr12Ni2WMoVNb、Cr17Ni2 不锈钢光滑及钝缺口试样(一般疲劳试验方法中的标准缺口试样  $K_t = 1.9$ ) 常规低应力高循环疲劳强度与回火温度的关系见表 1。

从表 1 看出, 一般来说, 提高材料的屈服强度  $\sigma_s$ , 将相应地使其高循环疲劳强度增加(包括常规缺口试样)。显然, 这与剩余疲劳强度与回火温度的关系相反。主要原因是光滑或钝缺口试样工作截面, 在试验过程中的受力状态(低应力、弹性应变范围)与叶片损伤区尖锐缺口受力状态(低的名义应力在损伤区引起应力集中, 使损伤处顶端产生微观塑性变形), 有本质的区别。前者只能识别材料强度的贡献, 后者能够识别材料强度与塑性恰当配合的贡献。

表 1 两种不锈钢常规疲劳强度与回火温度的关系

钢 号	热 处 理 工 艺		$\sigma_s$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\sigma_{-1}$ (光滑) 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\sigma_{-1}$ (缺口) 公斤/毫米 <sup>2</sup>
Cr17Ni2	1050°C 淬火	530°C 回火	92	61	38
		580°C 回火	90	49	30
1Cr12Ni2WMoVNb	1170°C 淬火	300°C 回火	106	67	
		580°C 回火	102	64	

献。从上述 $N_i$ 与不同回火温度的关系(图3)也表明,由于 $N_i$ 试验的试样,模拟了叶片损伤区尖锐缺口顶端的应力应变场,其结果与剩余疲劳强度同回火温度的关系相吻合。

当前在开展疲劳试验方法及其工程应用研究中,重点应放在接近使用条件下动态力学行为的研究。作为实验室条件下,为了寻求高的剩余疲劳强度的新材料及新工艺,在未进入试车阶段以前,选择合理的试样形状进行疲劳试验,具有重要的意义。

## 2. 裂纹扩展速率 $da/dN$ 随不锈钢回火温度变化的关系

由于实验时采用中等载荷水平, $da/dN$ 均在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 毫米/周范围内。在 $\Delta K_I$ 低于100公斤/毫米 $^{3/2}$ 范围内,图5至6表明,不同回火温度对两种不锈钢的 $da/dN$ 有一定的影响。它们均以680℃回火的 $da/dN$ 较低,560℃或580℃回火时 $da/dN$ 较高。

J.F.Throop及G.A.Miller等人研究了钢的回火温度与疲劳裂纹扩展速率的关系时,提出了下列公式:

$$\frac{da}{dN} = \frac{A \cdot K_{Ic}^{m_{max}}}{E \cdot \sigma_s \cdot K_{Ic}} \quad (9)$$

就其趋向来说,该式与本文实验结果吻合得较好。同两种钢材的剩余疲劳强度与回火温度关系的规律也是相吻合的。

## 3. 强度与塑性恰当配合的经验关系式

综上所述可知:

1) 两种不锈钢 $K_{Ic}$ (J)均以680℃回火较高,一般情况下, $K_{Ic}$ (J)愈高,则尖锐缺口 $N_i$ 及 $da/dN$ 等性能愈好;

2) 1Cr11Ni2W2MoV不锈钢发生断裂故障的热处理工艺,剩余疲劳强度较低,其 $K_{Ic}$ (J)也较低;

3) 1Cr12Ni2WMoVNb不锈钢的剩余疲劳强度较低的热处理工艺, $K_{Ic}$ (J)也较低。

因此,恰当地提高不锈钢材料的断裂韧性

$K_{Ic}$ (J)及 $N_i$ ,能够提高在使用条件下的疲劳寿命。

根据1Cr12Ni2WMoVNb等马氏体不锈钢剩余疲劳强度 $\sigma_{剩}$ 、 $N_i$ 、 $da/dN$ 及 $K_{Ic}$ (J)等参量之间随回火温度变化的关系,提出这类叶片材料强度与塑性恰当配合的经验关系式,用下式表示

$$\frac{K_{Ic}(J)}{\sigma_b} \geq 3.5 \sim 4 \quad (10)$$

考虑到叶片材料的使用可靠性,用下述经验方法进行检验

$$\frac{\sigma'_{剩}}{\sigma_a} \geq 1.5 \quad (11)$$

式中

$\sigma_a$ —叶片的稳态振动应力

$\sigma'_{剩}$ —经修正的叶片材料的剩余疲劳强度

## 六、结 论

1. 叶片材料的剩余疲劳强度是接近使用条件下动态力学行为的重要参量。用断裂力学方法进行的对比实验结果表明,它与光滑或缺口试样常规高循环疲劳强度的断裂机制有本质上的区别。前者对提高材料使用条件下疲劳寿命所作的有益贡献,即强度与塑性有恰当的配合,能够进行定量的评定,后者只能对提高材料的强度贡献进行评定。

2. 可用本文提出的方法确定1Cr12Ni2WMoVNb等不锈钢强度与塑性恰当配合的经验关系。

对新材料、新工艺研究,当未进入试车阶段以前,在实验室条件下,可采用 $K_t=6.7$ 尖锐缺口的板材试样的疲劳裂纹起始期 $N_i$ 进行初步选择试验。

(参考文献略)

(参加本文工作的有王志宏、齐树芝、王蕊华等同志,感谢颜鸣皋总工程师及刘才穆同志的帮助。——作者)