

# 基于微观划痕的疲劳强度预测

丁明超<sup>1</sup>, 张元良<sup>1</sup>, 咸宏伟<sup>1</sup>, 王金龙<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023; 2. 大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘 要:** 对微观划痕进行截面观察, 确定截面具有三角形的几何特征. 提出了适用于确定微观划痕投影面积的两原则: 方向无关和长度无关. 据此, 建立了微观划痕疲劳损伤参数  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$ , 定义为多条微观划痕中截面三角形面积平方根的最大值. 最后, 结合  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$  和 Murakami 理论, 提出了基于微观划痕的疲劳强度模型. 利用高强度钢 FV520B-I 疲劳强度实验和 Ti-6Al-4V 钛合金现有文献数据对模型进行验证, 结果表明该模型具有一定的疲劳强度预测精度优势.

**关 键 词:** 微观划痕; 疲劳损伤参数; Murakami 理论; 投影面积; 疲劳强度预测

**中图分类号:** TG 156; TH 140 **文献标志码:** A **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

**文章编号:** 1005-3026(2020)05-0693-07



## Fatigue Strength Prediction Based on Micro Scratches

DING Ming-chao<sup>1</sup>, ZHANG Yuan-liang<sup>1</sup>, XIAN Hong-wei<sup>1</sup>, WANG Jin-long<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China. Corresponding author: ZHANG Yuan-liang, E-mail: zylgzh@dlut.edu.cn)

**Abstract:** Based on the observation of micro scratches, the cross section of the scratches has the geometric characteristics of triangle. Two principles which are direction-independent and length-independent were proposed for determining the projection area of micro scratches. Accordingly, a new parameter  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$  was defined as the maximum square root of triangle area of micro scratch section, to describe fatigue damage quantitatively caused by the micro scratches. A modified fatigue strength model with the consideration of micro scratches was established by using the Murakami model and the term of  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$ . The model was validated by the fatigue strength experiment of high strength steel FV520B-I and the existing data of Ti-6Al-4V titanium alloy from literature. The results showed that the model had a certain advantage of prediction accuracy in fatigue strength prediction.

**Key words:** micro scratch; fatigue damage parameter; Murakami theory; projection area; fatigue strength prediction

航空发动机压气机叶片、大型离心压缩机叶片等高端制造装备对其关键零部件的表面质量要求极其严格, 其制造材料对表面质量较为敏感. 这些关键零部件在服役前后产生微观划痕是难以避免的. 虽然微观划痕尺寸较小(宽度为几十微米, 深度仅为几微米), 但在长期恶劣的服役环境中以及疲劳循环载荷下, 微观划痕极易诱发裂纹萌

生乃至发生疲劳断裂<sup>[1]</sup>, 这将对关键零部件的服役安全造成潜在的威胁. 因此, 对含有表面微观划痕的关键零部件开展疲劳强度预测是保障其服役安全运行首要面对的科学问题.

众多学者在研究表面划痕对疲劳强度的影响上取得了较多的成果. Siebel<sup>[2]</sup>揭示了划痕深度与疲劳强度成负线性的关系. Mayer 等<sup>[3]</sup>在对贝氏

收稿日期: 2019-07-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875082); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT17ZD230); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2018BDE02045).

作者简介: 丁明超(1990-), 男, 山东日照人, 大连理工大学博士研究生; 张元良(1959-), 男, 辽宁大连人, 大连理工大学教授, 博士生导师.

体轴承钢进行超高周疲劳试验中发现,疲劳裂纹倾向于从加工所产生的划痕萌生.当划痕深度达到 8 μm 时即可当作是疲劳预裂纹.

Murakami 提出了  $\sqrt{\text{area}}$  来定量表征由表面缺陷所引起的疲劳损伤<sup>[4]</sup>,定义为表面缺陷在与最大主应力垂直的面上的投影面积的平方根.

Murakami 结合  $\sqrt{\text{area}}$  和维氏硬度所提出的疲劳强度预测模型被广大学者认可和应用,并针对不同的研究对象进行了适用性修正<sup>[5-6]</sup>.

本文以微观划痕为研究对象,提出了基于微观划痕的疲劳强度模型.利用 ZYGO 对微观划痕截面的几何特征进行观察与分析;针对划痕的分布方向和长度的随机性,提出了适用于确定微观划痕投影面积的两个原则;建立了定量表征微观划痕所引起疲劳损伤的参数  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$ ;结合 Murakami 理论,提出了基于微观划痕的疲劳强度模型;利用高强度钢 FV520B-I 疲劳强度试验和 Ti-6Al-4V 钛合金现有文献数据对模型进行了验证,结果表明该模型具有一定的疲劳强度预测精度优势.

# 1 基于微观划痕的疲劳损伤参数

$$\sqrt{\text{area}_\Delta}$$

## 1.1 Murakami 理论

Murakami 对不同钢材料的疲劳试件开展疲劳强度试验,在试件表面预制具有不同几何形状的人造缺陷,部分形状如图 1 所示.表面缺陷的疲劳损伤参数  $\sqrt{\text{area}}$  即可利用简单几何面积公式求得.

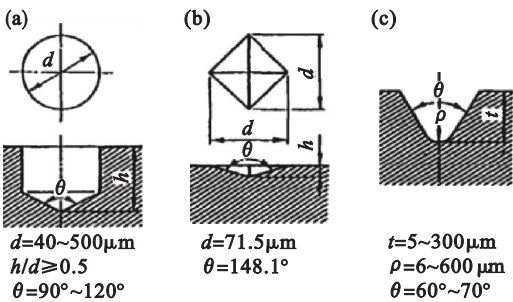


图 1 人造缺陷几何形状<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Geometries of artificial defects

(a) —洞状; (b) —维氏硬度压痕; (c) —缺口.

Murakami 通过对试验数据分析发现,应力强度因子阈值范围  $\Delta K_{th}$  与  $\sqrt{\text{area}}$  和维氏硬度 HV 可用式(1)表示:

$$\Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} (HV + 120) (\sqrt{\text{area}})^{1/3}. \quad (1)$$

对于表面裂纹, I 型开裂的最大应力强度因子可用式(2)表示,式中  $\sigma_0$  为拉伸加载应力,  $\sqrt{\text{area}}$  为裂纹的投影面积的平方根.

$$K_{I\max} = 0.65 \times \sigma_0 \sqrt{\pi \sqrt{\text{area}}}. \quad (2)$$

对于表面缺陷,  $\Delta K_{th}$  可利用式(2)表达,即将  $\sigma_0$  替换成  $2\sigma_w$  得式(3),  $\sigma_w$  为材料含有表面缺陷的疲劳强度:

$$\Delta K_{th} = 2K_{I\max} = 0.65 \times 2\sigma_w \sqrt{\pi \sqrt{\text{area}}}. \quad (3)$$

综上, Murakami 提出了著名的疲劳强度预测模型:

$$\sigma_w = \frac{c(HV + 120)}{(\sqrt{\text{area}})^{\frac{1}{6}}}. \quad (4)$$

式中,  $c$  为位置参数,对于表面缺陷  $c = 1.43$ . 由 Murakami 理论可知,含有表面缺陷的疲劳强度主要取决于两个因素:材料的维氏硬度 HV 和  $\sqrt{\text{area}}$ . 对于特定的材料,维氏硬度即为定值,可通过维氏硬度试验获得.表面缺陷对疲劳强度的削弱作用主要体现在  $\sqrt{\text{area}}$ ,  $\sqrt{\text{area}}$  越大,疲劳强度  $\sigma_w$  越小.

对于微观划痕,合理准确地评估其投影面积以确定疲劳损伤参数  $\sqrt{\text{area}}$  是建立基于微观划痕的疲劳强度模型首要解决的问题.这直接关乎疲劳强度的预测精度.

## 1.2 基于微观划痕的 $\sqrt{\text{area}_\Delta}$

为提出合理评估微观划痕投影面积的方法,应首先对划痕的微观形貌特征开展研究.由于微观划痕的尺寸处于微米级别,普通光学仪器难以呈现表面形貌的三维视图,划痕微观几何特征描述不够直观.本文采用三维光学干涉仪 ZYGO 对划痕进行观察. ZYGO 具有精度高、非接触式测量和微米级检测等优势,可为本文的微观划痕研究提供可靠的三维图形和尺寸测量等技术支持.图 2a 给出了 ZYGO 的主要组成部分:表面信息采集器、表面形貌实时显示器和操作系统.其中,操作系统可显示测量区域的表面粗糙度参数、三维视图以及任意截面的剖面图如图 2b 所示.

图 3a 展示了测量区域内捕捉到的一条微观划痕,如深色条带状所示.为观察划痕截面几何特征,任意选取划痕的三个截面,每个截面与划痕走向保持垂直关系以确保测量对象为划痕真实截面.图 3b ~ 图 3d 给出了三个截面所对应的剖面图.由剖面图可知,实际划痕截面具有形状不规则和边缘不规整的几何特征.对于微观划痕,在尺寸上宽度是深度的至少 6 倍以上.

由坐标轴可知,划痕开口位置具有较大的宽度,可达  $30\text{ }\mu\text{m}$ ,而划痕谷底宽度仅为几微米,呈由外向内收紧的趋势.划痕截面虽然不规则,但其

大致形状符合三角形的几何特征.为便于计算截面面积,认为该条划痕的截面面积可按三角形面积计算而得.

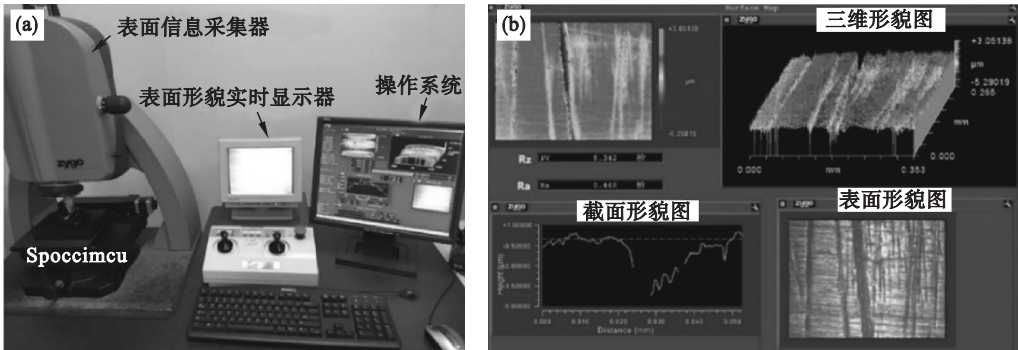


图 2 三维光学干涉仪 ZYGO  
Fig. 2 3D optical interferometer ZYGO  
(a)—主要组成设备;(b)—操作系统.

为了排除图 3 由于所选试件的特殊性而使得三个截面都保持三角形的特征,对其余试件的表面划痕形貌进行检测和观察,观察到所有截面仍

具有三角形的几何特征.因此本文将采用三角形近似计算划痕截面面积.

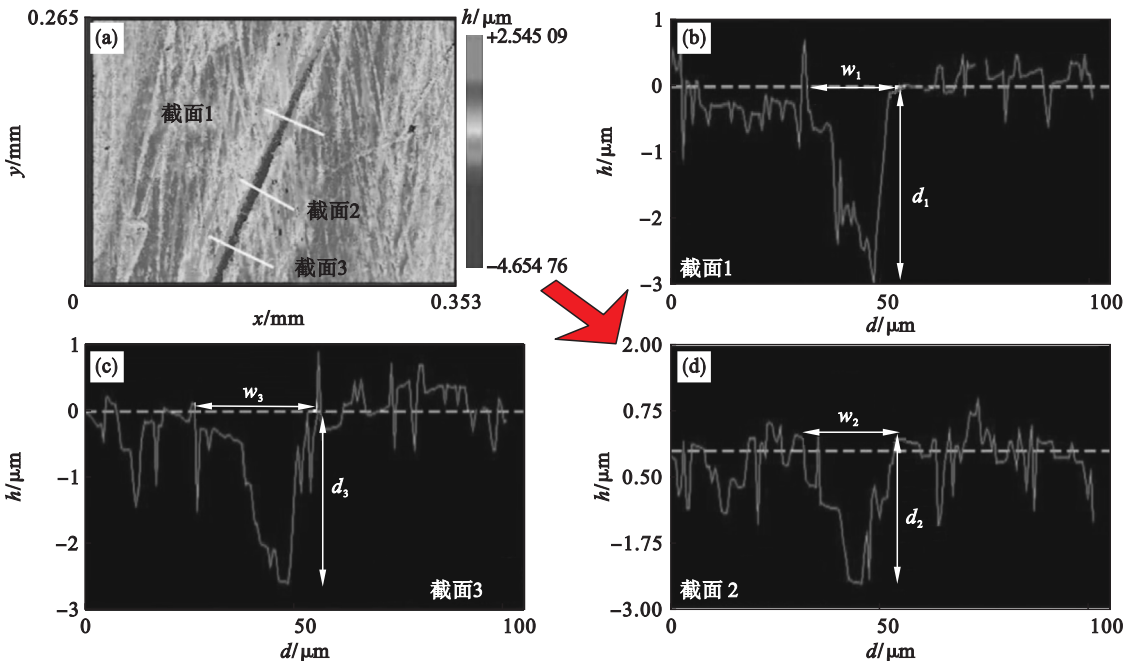


图 3 一条划痕的截面形状  
Fig. 3 Cross-section shape of one scratch  
(a)—测量区域内的一条划痕;(b)(c)(d)—划痕三个截面形状.

实际划痕的走向是随机分布的,与加载方向严格垂直或平行的划痕较少,二者存在一定的角度.划痕走向随机分布的特点是因外部力会以不确定角度作用于材料表面,作用角度依赖于实际情况而无规律可循<sup>[7]</sup>.另外,每条划痕的长度也各不相同,外部力作用时间不等将产生不同的划痕长度.实际划痕的方向和长度都依赖于外部力的作用,而外部力作用效果具有很大的随机性,无

明显的分布原则与表征规律.

按照 Murakami 理论的投影面积要求计算微观划痕的  $\sqrt{\text{area}}$ ,需要已知划痕走向与加载应力方向的角度以及划痕的长度,利用三角函数等数学关系求解最终的  $\sqrt{\text{area}}$ .若严格按照如此投影面积要求,考虑不同划痕走向和长度所得的  $\sqrt{\text{area}}$ 将存在较大的数值差距.例如 FV520B-I 部件的某划痕长度为  $0.35\text{ mm}$ ,划痕深宽分别为

3 μm 和 20 μm. 若划痕方向垂直于最大主应力方向,则  $\sqrt{\text{area}} = \sqrt{350 \times 3} = 32.4 \text{ }\mu\text{m}$ , 疲劳强度预测值为 132 MPa; 若加载方向平行于最大主应力方向,则  $\sqrt{\text{area}} = \sqrt{20 \times 3} = 7.7 \text{ }\mu\text{m}$ , 疲劳强度预测值为 550 MPa. 因微观划痕方向垂直于加载方向而导致疲劳强度降低到 132 MPa, 这显然不符合实际. 因此, 在处理微观划痕对疲劳强度影响的问题上, 严格按照 Murakami 理论的投影面积要求具有局限性.

为建立适用于评估微观划痕的疲劳损伤参数  $\sqrt{\text{area}}$ , 本文提出针对微观划痕投影面积的两个原则: 方向无关原则和长度无关原则. 本文认为微观划痕对疲劳强度的影响只取决于划痕的截面面积和维氏硬度, 与划痕的方向和长度无明显关系. 两个原则的有效性将在下节疲劳强度预测中进行论述.

在工程实践当中, 部件表面至少存在一条划痕, 多条划痕共存的情况也是十分普遍的. 较大尺寸的划痕相比于较小的将产生更严重的应力集中现象, 更容易引起裂纹的萌生. 对于多条微观划痕共存的情况, 本文不考虑划痕之间的相互作用, 认为多条划痕中具有最大投影面积的划痕对疲劳强度的削弱起决定作用.

综上所述, 本文提出基于微观划痕的疲劳损伤参数  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$ , 定义为多条微观划痕中截面三角形面积平方根的最大值. 图 3 给出了一条微观划痕三个截面的宽度和深度示意图, 分别为  $w_1, w_2,$

$w_3$  和  $d_1, d_2, d_3$ . 为准确描述实际微观划痕的尺寸特征, 一条划痕的深度  $D$  和宽度  $W$  可用式(5)计算, 对应的疲劳损伤参数  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$  可用式(6)表达. 若测量区域含有多条微观划痕,  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$  则为其中最大值.

$$W = \frac{w_1 + w_2 + w_3}{3}, D = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3}.$$

(5)

$$\sqrt{\text{area}_\Delta} = \sqrt{0.5WD}.$$

(6)

结合 Murakami 疲劳强度模型, 提出基于微观划痕的疲劳强度基础模型:

$$\sigma_w = \frac{1.43(HV + 120)}{(\sqrt{\text{area}_\Delta})^{\frac{1}{6}}}.$$

(7)

2 模型验证

本节对模型(7)的预测精度进行初步验证. 采用两种验证方式: 高强度钢 FV520B - I 疲劳强度验证试验和 Ti - 6Al - 4V 钛合金现有文献数据验证.

2.1 高强度钢 FV520B - I 的验证

高强度钢 FV520B - I 广泛应用于各种大型设备如离心压缩机叶片的制造. FV520B - I 试件的化学成分如表 1 所示. 试件的热处理过程为: 溶液处理 1 ~ 1.5 h, 空气冷却; 中间处理 750 ~ 850 ℃, 3 ~ 3.5 h, 油冷却; 时效处理在 (470 ± 10) ℃ 范围内持续 4 ~ 5 h, 并进行空气冷却. FV520B - I 的维氏硬度 (HV) 为 380 Kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup>.

表 1 试件化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of specimen (mass fraction)

%

Si	C	Ni	Cu	Mn	S	Cr	Mo	Nb	Fe
0.15 ~ 0.7	0.15 ~ 0.7	5 ~ 6	1.3 ~ 1.8	0.3 ~ 1	< 0.025	13 ~ 14.5	1.3 ~ 1.8	0.25 ~ 0.45	Bal

试验采用加载频率为 140 Hz 的 PLG - 100 疲劳试验系统, 应力比  $R = -1$ , 室温 (20 ℃). 疲劳试件采用最小直径为 6 mm 的变截面圆棒, 如图 4 所示.

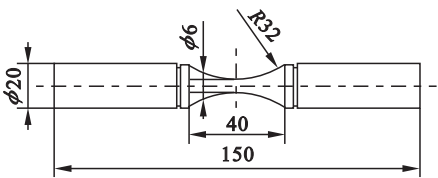


图 4 试件(单位:mm)

Fig. 4 Specimen(unit:mm)

当试件的疲劳寿命超过 10<sup>7</sup> 时所对应的应力幅值定义为疲劳强度, 不同划痕尺寸对应不同的疲劳强度. 本次试验目的为确定不同划痕尺寸下

的疲劳强度, 加载应力幅值为 600, 575, 550 和 525 MPa 四种, 加载顺序由大到小. 表 2 给出了应力幅值、 $R_a$  和疲劳寿命.

采用扫描电镜 (SEM) 对疲劳断口观察分析, 疲劳失效均发生于试件表面, 疲劳裂纹始于微观划痕根部.

Wang 等<sup>[8]</sup> 利用  $R_a$  替代表征表面缺陷的投影面积, 建立了考虑表面粗糙度对 FV520B - I 的疲劳寿命影响的公式. 式(8) 参数易得, 可较为方便地评估疲劳损伤.

$$\sqrt{\text{area}} = 2.97R_a.$$

(8)

表 3 分别给出了采用式(6) 和式(8) 的预测结果. 预测误差由式(9) 计算. 对比结果显示, 采



用  $\sqrt{\text{area}} = 2.97R_a$  预测结果偏大,平均误差可达 -20% ,远大于疲劳试验值,对部件的服役安全将

表 2 疲劳强度实验结果  
Table 2 Results of fatigue strength experiment

应力幅值/MPa	$R_a/\mu\text{m}$	疲劳寿命	应力幅值/MPa	$R_a/\mu\text{m}$	疲劳寿命
600	0.322	5.48E+05	550	0.567	1.00E+07
575	0.839	6.60E+05	575	0.558	1.00E+07
550	0.583	8.54E+05	525	0.554	2.00E+07

产生巨大安全隐患.相反地,采用  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$  预测 FV520B-I 的疲劳强度的精度较高,平均误差仅为 8% .

误差 =  $\left[\frac{\text{试验值} - \text{预测值}}{\text{试验值}} \times 100\right]\%$  . (9)

2.2 Ti-6Al-4V 钛合金的验证

Ti-6Al-4V 因其高比强度、耐腐蚀性和组

织相容性等优良特性在航空航天领域得到了广泛的应用,如压气机叶片.朱莉娜等<sup>[9]</sup>采用不同型号的砂纸打磨 Ti-6Al-4V 钛合金试件以产生不同尺寸的微观划痕.以微观划痕为研究对象,揭示了划痕宽深比对 Ti-6Al-4V 钛合金超高周疲劳性能的影响.

表 3 FV520B-I 的疲劳强度预测  
Table 3 Fatigue strength prediction of FV520B-I

宽度	深度	$\sqrt{\text{area}_\Delta}$	$R_a$	试验值	$\sqrt{\text{area}} = 2.97R_a$		$\sqrt{\text{area}_\Delta}$	
$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	MPa	预测值/MPa	误差/%	预测值/MPa	误差/%
37	3.96	8.55	0.554	525	658	-25.3	500	4.8
34.5	4.05	8.36	0.567	550	656	-19.2	502	8.7
28.95	4.40	7.98	0.558	575	657	-14.3	506	12.0

试验采用频率约为 20 kHz 的 TJU-HJI 型超声疲劳系统,应力比  $R = -1$ ,室温 (20 ℃).实验采用等截面超声疲劳试件. Ti-6Al-4V 钛合金的维氏硬度为 280 Kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup>.

试验结果表明 Ti-6Al-4V 钛合金在  $R = -1$  下疲劳裂纹全部从表面凹痕根部萌生,没有内部萌生的情况.

特别地,文献[9]第一次提出假设表面划痕的截面形状为半椭圆形,文中给出了试件划痕截面椭圆形的宽度  $2a$  与深度  $c$  数据,见表 4.文献[9]认为微观划痕引起的疲劳损伤参数  $\sqrt{\text{area}}$  可用半椭圆形面积表示:

$$\sqrt{\text{area}} = \pi ac/2. \tag{10}$$

半椭圆形法与本文的三角形法在描述划痕截面形状上存在一定的区别.为了验证两种方法的准确性,分别采用  $\sqrt{\text{area}} = \pi ac/2$  和  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$  对 Ti-6Al-4V 的疲劳强度进行预测,预测结果见表 4.

两种方法的疲劳强度预测误差都在 20% 左右,这也论证了直接采用划痕截面面积作为疲劳损伤参数具有一定的合理性和准确性.采用  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$  方法疲劳强度预测精度提高了 3 个百分点左右,表明  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$  更适合于表达微观划痕引起的疲劳损伤.

表 4 Ti-6Al-4V 钛合金疲劳强度预测  
Table 4 Fatigue strength prediction of Ti-6Al-4V

宽度 $2a$	深度 $c$	$\sqrt{\text{area}_\Delta}$	试验值	$\sqrt{\text{area}} = \pi ac/2$		$\sqrt{\text{area}_\Delta}$	
$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	MPa	预测值/MPa	误差/%	预测值/MPa	误差/%
15	0.7	2.65	600	468	21.9	486	18.9
16	1.6	3.46	575	448	22.1	465	19.1
15	3.0	4.90	520	423	18.7	439	15.6

### 3 基于微观划痕的疲劳强度模型

由上文预测结果可知,本文提出的疲劳强度基础模型具有一定的预测精度,但大部分预测误差仍为 10% 以上. 本小节将对基础模型在微观划痕层面上的疲劳强度预测进行适应性修正.

表 3 和表 4 中预测结果存在较大差距,前者误差在 10% 左右,而后者均为 15% 以上. 本文认为造成此预测差距的主要原因在于微观划痕的测量方法不同,导致划痕深宽数据的真实性存在差异. 本文在 FV520B-I 试验中采用 ZYGO 测量划痕深宽,而文献[9]采用触针法. 由图 3 可知,ZYGO 可以对垂直于划痕走向的截面深宽进行准

确测量,在较小误差范围内其测量结果可以真实反映实际划痕深宽.

图 5 给出了文献[9]采用触针法测量划痕截面深宽示意图. 显然,实际划痕的随机走向与固定的触针走向之间很少出现垂直关系,实际测量对象并非划痕真实截面,进而导致测量深宽数据在真实性上存在局限性. 相比于三维光学干涉仪 ZYGO,利用触针法采集划痕截面深宽数据具有较大误差.

虽然在采集划痕截面的真实深宽上具有一定局限性,但触针法作为一种有效的表面质量测量方式仍被工程实际应用所广泛接受. 因此,基础模型的适用性修正应兼顾该测量方法对疲劳强度预测的影响,以方便工程应用.

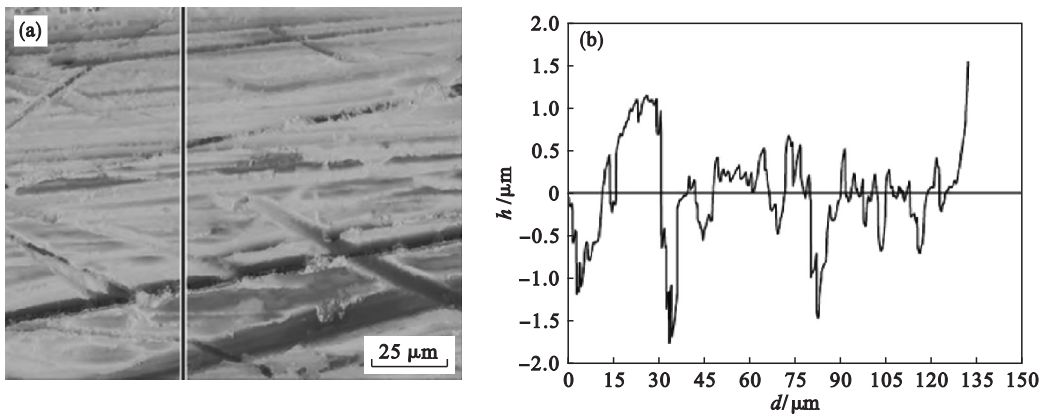


图 5 文献[9]测量划痕深宽示意图  
Fig. 5 Measurement of depth and width from[9]  
(a) —试件表面形貌; (b) —触针法表面轮廓图.

基于上述讨论,本小节将以 FV520B-I 试验数据为基准,对基于微观划痕的疲劳强度基础模型(7)进行适应性修正.

对于表面缺陷,位置参数  $c$  源于式(1),即应力强度因子阈值范围  $\Delta K_{th}$  与  $\sqrt{\text{area}}$  和维氏硬度间的最小二乘法拟合关系. 值得注意的是,该函数拟合关系,相比于微观划痕,是建立在具有较大尺寸的人造缺口基础之上. 由表 3 和表 4 可知,微观划痕最大深度不足  $5\text{ }\mu\text{m}$ ,而图 1 所示表面缺陷为人造表面缺口,二者在尺寸大小、形貌特征以及几何性质上具有较大差异. 因此,采用基于人造缺口疲劳试验数据所获得的位置参数  $c$  不适用于定量表征微观划痕对疲劳强度影响. 这也是采用基础模型(7)在处理微观划痕疲劳强度预测问题上具有一定误差的重要原因.

据上讨论,结合两种材料的试验数据,本文对位置参数  $c$  进行修正,提出基于微观划痕的疲劳

强度模型:

$$\sigma_w = \frac{1.06 \times 1.43 (HV + 120)}{(\sqrt{\text{area}_\Delta})^{\frac{1}{6}}}. \quad (11)$$

表 5 给出了采用修正后的疲劳强度模型对 FV520B-I 试验以及文献[9]试验数据进行重新预测,预测误差均控制在 6% 以内.

由上述验证可知,在微观划痕两原则的基础上,确定划痕的  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$  并未对疲劳强度预测结果产生消极作用. 基于两个原则的疲劳强度预测值处于稳定分布状态,预测精度具有一定的优势.

综上所述,采用  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$  描述微观划痕引起的疲劳损伤是合理的,  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$  的提出丰富了表面质量状况对疲劳性能影响的研究. 本文提出的修正模型在针对含有微观划痕的疲劳强度预测中具有一定的精度优势.

表 5 修正模型的疲劳强度预测结果

Table 5 Fatigue strength prediction by modified fatigue strength model

FV520B – I 疲劳强度试验			Ti – 6Al – 4V 钛合金疲劳强度试验		
试验值 MPa	基础模型 预测误差/%	修正模型 预测误差/%	试验值 MPa	基础模型 预测误差/%	修正模型 预测误差/%
525	4. 8	– 2. 9	600	18. 9	5. 4
550	8. 7	1. 4	575	19. 1	5. 7
575	12. 0	5. 0	520	15. 6	1. 5

4 结 论

- 1) 采用 ZYGO 对微观划痕截面形貌进行了观察,确定划痕截面具有三角形的几何特征.
- 2) 以 Murakami 表面缺陷投影面积的要求为基础,提出了适用于微观划痕的投影面积原则:方向无关和长度无关. 据此,建立了微观划痕的疲劳损伤参数  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$ , 定义为多条微观划痕中截面三角形面积平方根的最大值.
- 3) 结合  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$ ,对 Murakami 疲劳强度模型进行了修正,提出了基于微观划痕的疲劳强度模型. 利用高强度钢 FV520B – I 疲劳强度试验和 Ti – 6Al – 4V 钛合金现有文献数据对模型进行了预测精度验证,结果表明修正模型具有一定的预测优势.
- 4) 仍需要利用更多材料和微观划痕数据验证  $\sqrt{\text{area}_\Delta}$  的有效性.

参考文献：

[1] Cini A, Irving P E. Development of fatigue cracks from mechanically machined scratches on 2024-T351 aluminium alloy – part I: experimentation and fractographic analysis[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2017, 40: 776 – 789.

[2] Siebel E. Influence of surface roughness on the fatigue strength of steels and nonferrous alloys[J]. *Engineers Digest*, 1957(18): 109 – 112.

[3] Mayer H, Haydn W, Schuller R, et al. Very high cycle fatigue properties of bainitic high carbon-chromium steel [J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31: 242 – 249.

[4] Murakami Y. Metal fatigue effects of small defects and nonmetallic inclusions[M]. Oxford: Elsevier, 2002.

[5] Osmond P, Le V, Morel F, et al. Effect of porosity on the fatigue strength of cast aluminium alloys: from the specimen to the structure[J]. *Procedia Engineering*, 2018, 213: 630 – 643.

[6] Serrano-Munoz I, Buffiere J Y, Verdu C, et al. Influence of surface and internal casting defects on the fatigue behaviour of A357-T6 cast aluminium alloy [J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 82: 361 – 370.

[7] Khan M K, Fitzpatrick M E, Hainsworth S V, et al. Effect of tool profile and fatigue loading on the local hardness around scratches in clad and unclad aluminium alloy 2024 [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 527 ( 1/2 ): 297 – 304.

[8] Wang J L, Zhang Y L, Sun Q C, et al. Giga-fatigue life prediction of FV520B-I with surface roughness[J]. *Materials & Design*, 2016, 89: 1028 – 1034.

[9] 朱莉娜, 邓彩艳, 王东坡, 等. 表面粗糙度对 Ti – 6Al – 4V 合金超高周疲劳性能的影响[J]. *金属学报*, 2016, 5: 583 – 591.

(Zhu Li-na, Deng Cai-yan, Wang Dong-po, et al. Effect of surface roughness on very high cycle fatigue behavior of Ti-6al-4V alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 5: 583 – 591. )