电位法测量微缺口试样的数值分析*

杨迪迪1,施 祎1,杨晓光1,2,苗国磊3,石多奇1,2

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院,北京 100191;
2. 先进航空发动机协同创新中心,北京 100191;
3. 成都航利(集团)实业有限公司,四川 彭州 611936)

摘 要:疲劳寿命受到材料内部缺陷的制约,可以通过电位法试验获得微缺口试样的疲劳裂纹扩展 规律,进而分析缺陷对材料疲劳寿命的影响。在试验前,需要预先研究试验的主要影响因素。利用 COMSOL有限元软件,研究了电流输入点位置和电势差测点位置对试验精度和试验复现性的影响,计算 得到不同裂纹前缘形状对应的电位法校核曲线。结果表明:(1)电流输入点位置位于试样平行于裂纹面 的上下表面时,可以保证试验的复现性。(2)当测点位于裂纹面的垂直对称面上,且测点距离裂纹面垂 直距离为0.06~0.1倍试样宽度时,可以同时满足测试精度和复现性。(3)当裂纹宽度和裂纹深度的比值> 3时,可以不考虑裂纹前缘形状对校核曲线的影响,当裂纹宽度和裂纹深度的比值<3时,裂纹前缘形状 对校核曲线的影响较大。

关键词:涡轮盘;高温合金;裂纹扩展;疲劳寿命;电位法 中图分类号:V231.9 文献标识码:A 文章编号:1001-4055 (2020) 07-1587-07 DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190160

Numerical Analysis of Potential Drop Test on Micro-Notched Specimen

YANG Di-di¹, SHI Yi¹, YANG Xiao-guang^{1,2}, MIAO Guo-lei³, SHI Duo-qi^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China;

3. Chengdu Holy Industry & Commerce Corp. LTD, Pengzhou 611936, China)

Abstract: The fatigue life is limited by the defects of the material. Crack propagation behavior of the micronotched specimen can be studied by the potential drop method. Thus, the influence of the defects on the fatigue life was analyzed. Before the test, the numerical analysis was conducted, using COMSOL finite element software, to investigate the main influencing factors of the test. The effects of the current input position and probe position on the accuracy and reproducibility of the test are studied. And the potential drop method's calibration curves are calculated for different crack front shapes. The results suggest that: (1) When the current input position is on the upper and lower surfaces of the specimen which paralleled to the crack surface, the reproducibility of the test can be guaranteed. (2) When the probe position is located on the vertical symmetry plane of the crack surface, and

E-mail: yxg@buaa.edu.cn

^{*} 收稿日期: 2019-03-18; 修订日期: 2019-06-20。

基金项目:国家自然科学基金(51775019);国家重点基础研究发展计划(2015CB057401)。

作者简介:杨迪迪,硕士生,研究领域为高温合金裂纹扩展。E-mail: yangdidi@buaa.edu.cn

通讯作者:杨晓光,博士,教授,研究领域为高温结构及材料的疲劳与断裂,本构理论及疲劳寿命预测等。

引用格式:杨迪迪,施 祎,杨晓光,等.电位法测量微缺口试样的数值分析[J].推进技术,2020,41(7):1587-1593. (YANG Di-di, SHI Yi, YANG Xiao-guang, et al. Numerical Analysis of Potential Drop Test on Micro-Notched Specimen[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(7):1587-1593.)

the vertical distance of the probe position is 0.06~0.1 times of the specimen width from the crack surface, the test accuracy and reproducibility can be satisfied at the same time. (3)If the ratio of crack width to crack depth is larger than 3, the influence of crack front shape on the calibration curve can be neglected. But if the ratio is smaller

than or equal to 3, the crack front shape will influence the calibration curve significantly.

Key words: Turbine disk; Superalloy; Crack propagation; Futigue life; Electrical potential method

1 引 言

镍基粉末高温合金因其优越的力学性能成为目前高性能发动机涡轮盘的首选材料。该合金在冶金 过程中不可避免会引入缺陷,主要包括:夹杂、热诱 导孔洞和原始颗粒边界^[1],由于缺陷的存在,缺陷周 围局部力学性能以及应力状态发生改变,导致微小 裂纹的过早萌生从而降低材料的疲劳寿命。航空发 动机涡轮部件80%的失效是由疲劳造成的^[2],为了保 证发动机运行安全,需要研究缺陷处裂纹扩展规律。

材料层面的缺陷起裂研究是十分必要的。首先 在材料表面加工微缺口模拟表面缺陷,研究缺陷对 裂纹扩展规律的影响,并利用断裂力学的方法分析 缺陷对疲劳寿命的影响。微缺口处的裂纹扩展过程 包含裂纹萌生、小裂纹扩展以及长裂纹扩展阶段,其 中小裂纹阶段扩展规律与长裂纹不同,低于长裂纹 门槛值时小裂纹依然会扩展;相同应力强度因子下 小裂纹扩展速率高于长裂纹,使用长裂纹扩展规律 进行寿命预测,会导致预测寿命偏高^[3],所以需要关 注小裂纹阶段的裂纹扩展规律。但测量裂纹尺寸的 减小会提高试验难度,需要对试验方案进行进一步 的研究和分析。

缺陷周围的裂纹同时在试样表面和垂直于试样 表面的方向扩展。目前裂纹扩展规律的主要试验方 法有:光学法、覆膜法、柔度法和电位法等^[4-5]。光学 法和覆膜法仅能获得试样表面的裂纹信息,不能获 得垂直于试样表面方向的裂纹信息;而柔度法需要 通过引伸计测量裂纹尖端位移信息,并转化为裂纹 长度,对于微缺口试样难以放置引伸计;相比之下电 位法利用裂纹长度与试样电阻间的对应关系,依据 电阻定律:裂纹长度增大,裂纹面剩余横截面积减 小,电阻增大,在恒流的试验条件下,裂纹面两侧电 势差增大,从而获得裂纹长度与电势差变化的对应 关系,得到裂纹扩展规律。并且Johnson^[6]指出,电位 法测得的电势差比值仅与裂纹长度和试样的几何尺 寸相关,而与试件的材料、热处理方式、厚度等无关。

电位法具有测量稳定、可复现性强以及可靠性 高的优点,在近十年的疲劳试验研究中获得了广泛 的应用,尤其是观察裂纹闭合现象以及复杂裂纹扩展过程^[3],适合于小裂纹阶段的观察。电位法的核心 在于校准曲线的获得,目前相关测试标准如ASTM E647^[7]已提供了关于紧凑拉伸试样(CT试样)、中心 试样的长裂纹扩展的校准曲线,但针对由微小缺口 产生的小裂纹扩展标定曲线并未列出。

目前校准曲线的获得方法主要分为3类:

(1)试验法获得:在电位法试验中同步采用光学 法以及光学法的延伸方法在试样表面直读裂纹长 度^[8]、在循环中加入过载循环形成断口条纹记录裂纹 长度^[9]、利用覆膜法记录裂纹长度^[10]。

(2)解析法获得:Schwalbe等^[11]将Johnson公式^[6] 在单边缺口试样、CT试样和中心试样中应用,直接计 算得到校核曲线。但是解析解的适用范围较窄,对 复杂试样或者复杂裂纹形状的计算存在局限性。

(3)有限元计算获得:有限元计算方法成本低、 效率高,应用广泛。Hicks^[9]针对CT试样的穿透裂纹 和方棒试样的角裂纹、中心表面裂纹进行了有限元 计算,并与试验结果吻合较好。Aronson等^[12]给出了 CT试样的最佳电流输入位置和电压测点位置。Gandossi等^[13]利用有限元二维和三维模型计算环形缺口 试样的校核曲线,并指出了非对称缺陷计算的复杂 性。Cheputeh等^[14]采用自编C++软件分析了二维中 心试样和单边试样的电场分布,证明对于穿透裂纹, 数值计算的校核曲线与解析结果非常接近。但是目 前对于微缺口处的非穿透裂纹模拟较少。

本文采用数值模拟方法,分析在通电情况下微缺口处产生裂纹的电势差变化规律,进一步研究电流输入点位置和电势差测点位置对试验精度和试验 复现性的影响,计算不同裂纹前缘形状对应的校核 曲线(*a* - *V*/*V*₀),为后续的电位法试验提供参照。

2 有限元建模

2.1 模型控制方程

在 COMSOL 软件中,通过控制方程给出边界条件,并根据本构关系,对电场进行求解。电场强度 E 通过式(1)与电流 A 和电势差 V联系,∇为哈密顿算子(梯度算子)。

E = ∂A/∂t - ∇V (1) 由于电位法试验在电流恒定条件下进行,∂A/∂t = 0,所以式(1)可简化为

$$\boldsymbol{E} = -\nabla \boldsymbol{V} \tag{2}$$

材料属性通过电导率体现,表达式为

$$\boldsymbol{j} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{E} + \boldsymbol{j}_{\mathrm{e}} \tag{3}$$

式中**j**为电流密度,**o**为电导率,**Q**_j为电流源,**j**_e为 外部产生的电流密度。在恒流源条件下,由上述方 程可得

$$\nabla \cdot \boldsymbol{j} = -\nabla (\boldsymbol{\sigma} \cdot \nabla V - \boldsymbol{j}_{e}) = \boldsymbol{Q}_{i}$$
(4)

边界条件为模型外表面以及已经扩展的裂纹面 为绝缘面,定义外法线方向上的电流密度为0,即

$$\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{j} = \boldsymbol{0} \tag{5}$$

2.2 有限元建模

根据ASTM E647^[7],模拟电流选为15A,由于镍 基高温合金各温度下平均电导率在10⁶S/m量级^[15], 在有限元建模时,材料的电导率参数设定为10⁶S/m。

试样的试验段为中心开微缺口的长方体,由于 裂纹对远场的电压影响较小,所以选取局部模型进 行分析,中心表面裂纹模型如图1(a)所示,局部模型 宽度 w=8mm,厚度 t=4mm,定义裂纹宽度为c,裂纹深 度为a,坐标零点取在试样对称中心处。

如图1(b),在裂纹面上下两侧选取对称的两个 点作为电势差测点,在有限元计算过程中记录两点 间电势差随裂纹长度的变化。

微缺口在有限元模拟中使用半球形凹坑进行模拟,如图2。模型使用四面体单元进行划分,并在裂纹临近区域内进行网格加密,如图2,加密的网格尺 寸为10μm。且保证裂纹面以及测点位置包含在加 密区内,以保证测量精度。

2.3 有限元计算校核

目前微缺口试样裂纹扩展的电位法试验存在一 定技术难度,在公开文献中没有找到相应的校准曲 线的数据。为了校核本文使用的有限元计算方法, 利用文献[16]中单边缺口试样的校准曲线进行方法 校核。

建立单边缺口试样的有限元模型,将模型计算 结果、试验结果^[16]和Johnson解析解进行比较,结果如 图 3。有限元计算与试验的结果相对误差小于4%, 与解析解的相对误差小于2%,可以认为对于单边缺 口的贯穿裂纹,有限元计算结果与试验结果基本一 致,且有限元计算结果与解析结果也基本一致,证明 了有限元方法计算校核曲线的可行性和可信度。





Fig. 3 Comparison among the calibration curves calculated by numerical, experimental and analytical methods

3 结果与讨论

3.1 电流输入点位置的影响

分别在距离裂纹面0.5mm,2mm和7mm的6个截

面上取2个点,如图4所示。当裂纹深度 a 为 0.1mm 时,分别计算电流输入点位置在裂纹同侧、裂纹对侧 以及裂纹两侧时的测点电势差。其中电流两输入点 位置是 a-a',b-b'和 c-c'时,称电流输入点在裂纹同 侧;电流两输入点位置是 d-d',e-e'和 f-f'时,称电流 输入点在裂纹对侧,电流两输入点位置是 d-a',e-b' 和 f-c'时,称电流输入点在裂纹两侧。

含微缺口试样的电流分布如图 5,微缺口均在左 侧表面上。电流输入点距离裂纹面越远,试样内电 流分布更加均匀。不同电流输入位置对应的测点间 电势差如图 6。当电流输入点与裂纹在同侧,电流输 入点越远离裂纹面,测点间的电势差越小,需要高灵 敏度的试验设备,电流输入点在 *c*-*c* '处测得的电势差 仅为 *a*-*a* '处的 2%;当电流输入点分别位于裂纹两 侧,得到相似的结论,只是电流输入点在*f*-*c* '处测得 的电势差变为 *d*-*a* '处的 4%。但是当电流输入点位 于裂纹对侧时,电流输入点在*f*-*f* '处对应的电势差 比*d*-*d* '处略大。

在同一截面上,不同的电流输入点位置得到不同的测点间电势差,从测量精度的考虑出发,采用相同的输入电流值,电流输入点越靠近裂纹面,测点间电势差越大,可以使用较小的输入电流获得足够大的电压输出量,对测量设备的灵敏度要求降低,同时可以减小试样和导线的发热。但是对于远离裂纹面的电流输入点,位置的变化基本不影响测点间电势差。为了保证试验的复现性,减少试验过程中的不确定因素,可以将电流输入点位置放置在距离裂纹面稍远的位置,如放置在有限元模型中平行于裂纹面的上下表面处,在试验中,可以放置在试验标距段两侧的位置,通过在一定程度上增大电流值,弥补由于电流输入位置的改变造成的测点间电势差的减小。

3.2 测点位置的影响

由于不同测点位置间的电阻不同,测得的电势 差和校核曲线也不同,通过选择合适的测点位置,保 证试验具有足够的测量精度和复现性。

长裂纹电位法试验的测点位置选择已经有了一 些经验和结论^[17],本文主要关注小裂纹扩展阶段,研 究测点在*x*和*y*方向上位置变化对试验精度和复现性 的影响,为了保证计算结果的精度,模型的网格划分 按照2.2节给出的划分标准进行,当测点位置超出加 密区时,在测点周围重新划分网格加密区,计算结果 如图7。



Fig. 4 Schematic of the current input positions



Fig. 5 Comparison among the current distribution at different current input position with a micro-notch in the middle position on the left surface

如表1所示,当测点在y方向的位置从距离裂纹 面 0.2mm 增大至 2mm,测点间的电势差从 191.63µV 增大至 1875.05µV。但当裂纹长度从 0.1mm 增大至 0.2mm 时,引起电势差变化,从 20.3µV 减小至 0.38µV。现有的电压检测设备可以测量到 10nV 的 数量级,但是为了避免电压漂移的影响,测量 1µV 以 上的变化量较为准确。

如表2所示,当测点在x方向的位置从距离裂纹 垂直对称面0mm增大至0.5mm,测点间的电势差不



Fig. 6 Comparison among the potential drop at different current input positions

产生明显的变化;但裂纹长度从0.1mm增大至0.2mm时引起的电势差变化从20.3µV减小至1.81µV。可见x方向测点位置的变化比y方向对试验精度的影响更加明显。

测点位置在y方向远离裂纹面时,测点周围的电 场分布相对于裂纹处更均匀,测得的电势差难以准 确地反映出裂纹长度改变对电场分布的影响,所以 理想的测点位置是y方向距离裂纹面距离尽量小。 但是考虑到实际操作过程中,多次试验时测点位置 难以固定在同一处,测点位置的变动会导致测量值 的变动,为了保证试验测量的精度和复现性,y方向 的最佳测点位置为图7中给出的0.5mm~0.8mm 区域, 即距离裂纹面0.06w~0.1w位置处,此时既能测得裂 纹长度的变化,测点位置的变动也不会引起过大的 电势差变化,但是在实际试验操作中,准确且稳定的 测点位置目前有较大的难度,需要在试验中不断进 行摸索,目前考虑使用0.1mm的电阻丝进行点焊或者 碰焊。同时焊接方面的工艺参数也需要经过调试, 以确保焊点在试验过程中的稳固性。

由于测得的电势差与测点所在的平行于 oyz 平面

内的裂纹深度有关,对于穿透裂纹,测点在x方向位置的变化不影响电势差值,但是对于表面裂纹,测点 在x方向的位置偏离裂纹垂直对称面时,测量结果受 到很大的影响,所以可以使用多组测点测量裂纹 形状^[17]。

对于小裂纹阶段的测量,测点在x方向的位置偏移过大会导致在裂纹扩展前期测点所在的平行于oyz 平面内的裂纹深度为0,无法记录裂纹长度的变化, 所以要尽可能保证测点位置在裂纹垂直对称面上。



Fig. 7 Comparison among the potential drop change at different probe positions in *x* and *y* direction

3.3 裂纹前缘形状的影响

通过有限元计算,可以得到不同裂纹前缘形状的校准曲线,为分析裂纹前缘形状对校准曲线的影响,定义裂纹形状因子 c/a 来描述裂纹前缘形状,其中 c 为裂纹宽度, a 为裂纹深度,不同 c/a 的裂纹前缘形状如图 8 所示。

测点距裂纹面 0.2mm, 0.5mm, 0.8mm 以及 1mm 时,得到的不同裂纹形状因子下的校准曲线趋势基 本一致,如图9所示,其中d代表测点距裂纹面的距 离。但是随着测点远离裂纹面,校准曲线对裂纹长 度变化的灵敏度迅速降低, 当测点距离裂纹面 1mm

Table 1	Potential drop	for different	probe positions	in the y direction
---------	----------------	---------------	-----------------	--------------------

Distance in <i>y</i> direction/mm	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2	2.0
Potential drop (crack length=0.1mm)/ μV	191.63	283.23	469.48	750.30	1125.13	1875.05
Potential drop (crack length=0.2mm)/ μV	211.93	294.76	474.25	752.30	1126.06	1875.43
Potential drop change/µV	20.3	11.53	4.77	2.00	0.93	0.38

 Table 2
 Potential drop for different probe positions in the x direction

Distance in <i>x</i> direction/mm	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Potential drop (crack length= 0.1 mm)/ μ V	191.63	190.61	189.16	188.31	187.93	187.74
Potential drop (crack length=0.2mm)/ μV	211.93	208.29	200.95	194.61	191.21	189.55
Potential drop change/ μV	20.30	17.68	11.79	6.30	3.28	1.81



Fig. 8 Schematic of crack front shape

时,对于 0.5mm 以下的裂纹变化基本无法识别;当测 点距离裂纹面 0.8mm,基本能够实现小裂纹长度的变 化的识别;当测点距离裂纹面 0.5mm 及以下时,能够 完全识别出小裂纹长度的变化,与 3.2节获得的结论 吻合。

随着裂纹形状因子 c/a 的增大, 校准曲线趋于稳

定,当 c/a > 3时,可以认为裂纹形状因子的变化基本 不影响电位法的校准曲线,尤其是在小裂纹扩展阶 段,对于关注小裂纹阶段的微缺口试样,可以忽略裂 纹形状因子变化对校准曲线的影响;但是对于 c/a < 3 的情况,裂纹形状因子对校准曲线影响非常大。

在裂纹扩展试验过程中,需要记录裂纹的前缘 形状^[2,9],或者在试验后反算裂纹前缘形状^[18],修正有 限元计算时不同裂纹深度下的裂纹形状,得到符合 试验扩展规律的校核曲线。

对于实际扩展情况中,裂纹前缘形状较少出现 cla > 3的情况,所以在电位法的校准曲线的计算中, 裂纹前缘形状几乎是必须考虑的影响因素。对于裂 纹形状在扩展过程中的变化,也可以用有限元的方 法较为便捷地得到相应的校准曲线。



Fig. 9 Comparison among the calibration curves for different crack front shapes

4 结 论

本文通过有限元的方法,分析了电位法在微缺 口试样中的应用,得到以下结论:

(1)对于微缺口试件,可以利用有限元法计算电 位法的校核曲线,并分析电位法试验中电流输入点 位置、测点位置和裂纹前缘形状对电位法试验的 影响。

(2)为了保证试验的复现性,电流输入位置可以

选择在试样的上下表面,即使在多次试验中电流输 入位置有变化,也基本不影响试验的结果。

(3)为了保证试验精度和复现性,推荐测点位置 在y方向距离裂纹面 0.06w~0.1w;在x方向尽量位于 裂纹垂直对称面上。

(4)当裂纹形状因子 c/a > 3时,基本不需要考虑 裂纹前缘形状对校核曲线的影响;当裂纹形状因子 c/a ≤ 3时,校核曲线受到裂纹前缘形状的影响较大, 需要尽量在试验中记录下裂纹前缘形。 **致** 谢:感谢国家自然科学基金和国家重点基础研究 发展计划项目的资助

参考文献

- [1] 刘新灵,陶春虎.粉末高温合金缺陷特性及寿命预测 方法研究进展和思考[J].材料导报,2013,27(1): 92-96.
- [2] 蔡泽高.金属的疲劳断裂[J].上海金属,1984,(1): 56-68.
- [3] Doremus L, Nadot Y, Henaff G, et al. Calibration of the Potential Drop Method for Monitoring Small Crack Growth from Surface Anomalies Crack Front Marking Technique and Finite Element Simulations [J]. International Journal of Fatigue, 2015, 70: 178-185.
- [4] 张利娟,张亚军,高灵清.表面裂纹长度的测量方法[J].材料开发与应用,2009,24(5):75-79.
- [5] 韩敬宇.基于声发射技术的风电叶片裂纹无线监测系统研究[D].北京:北京化工大学,2010.
- [6] Johnson H H. Calibrating the Electric Potential Method for Studying Slow Crack Growth [J]. Materials Research and Standards, 1965, 5(9): 442-445.
- [7] ASTM-E647-15. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates[S].
- [8] Hill M R, Stuart D H. Direct Current Potential Difference Correlation for Open-Hole, Single-Crack Coupons
 [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 99: 141-146.
- [9] Hicks M A. A Comparison of Theoretical and Experimental Methods of Calibrating the Electrical Potential Drop Technique for Crack Length Determination, International
 [J]. Journal of Fracture, 1982, 20(2): 91-101.
- [10] 吴 楠,张显程,涂善东,等.室温和650℃下晶粒尺 寸对GH4169合金疲劳小裂纹萌生和扩展行为的影响

[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20): 66-75.

- [11] Schwalbe K H, Hellmann D. Application of the Electrical Potential Method to Crack Length Measurements Using Johnson's Formula[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1981, 9(3): 218-220.
- [12] Aronson G H, Ritchie R O. Optimization of the Electrical Potential Technique for Crack Growth Monitoring in Compact Test Pieces Using Finite Element Analysis [J]. Journal of Testing and Evaluation, 1979, 7(4): 208-214.
- [13] Gandossi L, Summers S A, Taylor N G, et al. The Potential Drop Method for Monitoring Crack Growth in Real Components Subjected to Combined Fatigue and Creep Conditions: Application of FE Techniques for Deriving Calibration Curves [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2001, 78(11-12): 881-891.
- [14] Cheputeh N A, Maneeratana K, Kasitvitamnuay J. A Finite Volume Simulation of Electrical Potential Drop in 2D Cracked Plates [C]. Pathum: 2015 International Conference on Science and Technology, 2015.
- [15] 《航空发动机设计用材料数据手册》编委会. 航空发动 机设计用材料数据手册. 第四册[M]. 北京:航空工业 出版社, 2010.
- [16] Tumanov A V, Shlyannikov V N, Chandra Kishen J M. An Automatic Algorithm for Mixed Mode Crack Growth Rate Based on Drop Potential Method [J]. International Journal of Fatigue, 2015: 81: 227-237.
- [17] 王 亮,黄新跃,郭广平.直流电位法检测高温合金的疲劳裂纹扩展性能[J].理化检验(物理分册), 2011,47(8):480-482.
- [18] Enmark M, Lucas G, Odette G R. An Electric Potential Drop Technique for Characterizing Part-Through Surface Cracks [J]. Journal of Nuclear Materials, 1992, 191 (5): 1038-1041.

(编辑:史亚红)