



基于涡流无损检测技术的金属表面缺陷三维模拟分析

李翰超^{1,2*}, 古阳², 于亚婷¹

(1. 电子科技大学机械与电气工程学院 成都 611731; 2. 电子科技大学材料与能源学院 成都 611731)

【摘要】该文研究了人工预制缺陷(矩形缺陷)模型的检测以及疲劳缺陷(三角形缺陷)模型的检测。通过 COMSOL Multiphysics 建立的人工预制缺陷以及疲劳缺陷的三维数值计算模型,详细研讨了金属铝材出现这两种不同缺陷时,其深度和高度与磁通密度 Z 分量之间的关系,并且以无缺陷模型作为对比,分析了磁通密度 Z 分量的差分信号。同时,通过 COMSOL Multiphysics 建立的含缺陷的脉冲涡流检测系统的有限元分析模型,详细分析了两种不同缺陷的磁通密度模值分布随缺陷高度和深度的定量演化规律。该文的研究集中在表面缺陷中的人工预制缺陷以及疲劳缺陷模型,研究结论将有利于深入理解缺陷检测原理,并且可以应用于金属构件表面缺陷的定量检测中。

关键词 涡流检测; 磁通密度; 无损检测; 表面缺陷

中图分类号 TH04-0; X941 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2019201

3D Simulation Analysis of Metal Surface Defects Based on Eddy Current Non-Destructive Testing

LI Han-chao^{1,2*}, GU Yang², and YU Ya-ting¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. School of Materials and Energy, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract This paper studies the detection of artificial prefabricated defect (rectangular defect) models and the fatigue defect (triangular defect) models. A three-dimensional numerical calculation model for artificial prefabricated rectangular defects and fatigue defects was established by COMSOL multiphysics. The depth and height of the crack defects are different in detail. The relationship with the magnetic flux density Z component is discussed, meanwhile, taking the defect-free model for comparison, the differential signal of the magnetic flux density Z component is analyzed. The finite element analysis model of the eddy current testing system established by COMSOL multiphysics is used to analyze the quantitative evolution of the flux density distribution of the two different cracks with the correspond crack height and depth. Both artificial prefabricated defect and fatigue defect on the surface are considered in this research, the achieved results is useful for deeply understanding the eddy current detection principle, and also can be applied in quantitative detection of natural defects in metal components.

Key words eddy current detection; magnetic flux density; nondestructive testing; surface cracks

在交通、航空航天、核能、电力等诸多工程领域,材料或机件的突然断裂,在工程上是普遍存在的现象。据统计,对于航空航天飞行器、矿山、冶金动力以及运输机械等重大装备,疲劳失效是其零件或构件的主要失效形式,疲劳断裂的比率占构件断裂的 80% 以上^[1]。实际上,带缺陷构件引起的疲劳裂纹往往没有明显的塑性变形,不易觉察出来,常会导致灾难性事故,引起巨大的经济损失和

人员伤亡^[2-3]。因此,研究结构缺陷检测,预测疲劳寿命,对于预防灾难性事故,保障人民的生命和财产安全具有重大意义。

电涡流理论成型于 19 世纪初,在 19 世纪中后期电涡流理论开始应用于对金属以及合金的无损探测^[4]。随着现代科学技术以及工业的迅速发展,无损检测 (nondestructive testing, NDT) 变得越来越不可或缺。其中电磁检测方法是利用待测件在电磁作用

收稿日期: 2019-09-09; 修回日期: 2020-07-28

基金项目: 中央高校基础研究基金 (ZYGX2018J067); 广东省自然科学基金 (2018A030313893)

作者简介: 李翰超 (1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事金属缺陷应力方面的研究. E-mail: lihancho@uestc.edu.cn

下呈现的电磁学特性, 从而得知材料有关的性能, 其在金属裂纹检测应用研究中取得巨大的进展。涡流检测 (eddy current testing, ECT) 方法也是建立在电磁感应原理的基础上, 适用于各种导电材料。当导体置于交变磁场中, 导体内部就会产生感应电流 (涡流), ECT 便是把待测件靠近通有交流电的线圈, 该线圈产生交变磁场, 当磁场通过待测件时便会在其内部产生涡流, 涡流自身也会产生磁场, 该磁场就会对原磁场产生影响, 进而导致线圈的电压以及阻抗发生改变。当待测件表面或者近表面出现缺陷时, 其内部的涡流分布会发生改变, 而涡流的变化会引起检测线圈电压和阻抗的变化, 同时影响到线圈周围磁场分布的变化, 通过分析该变化可以推测待测件表面缺陷的存在^[1]。在涡流检测中, 常用的检测线圈有穿过式线圈、内插式线圈以及探头式线圈, 在本模拟中使用的是探头式线圈, 并且为绝对式自感应检测线圈, 即只有一只线圈用来检测。

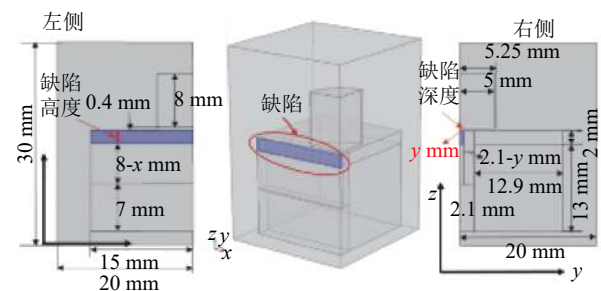
文献 [5-6] 利用原位涡流探伤的方法针对某型飞机轮舱支臂耳片故障进行了分析, 确定了支臂耳片裂纹故障, 并利用荧光渗透法进行了验证, 同时也对舰载直升机主桨毂轴颈缺陷实施涡流检测, 并取得了良好的检测效果。文献 [7] 通过分析脉冲涡流信号, 利用多元线性回归方法预测缺陷深度, 并且在多层线性模型中利用预设的深度预测缺陷的倾角。文献 [8] 使用涡流检测方法检测了飞机叶片边缘的微裂纹, 发现飞机叶片的边缘的曲率、厚度、表面磁导率以及其他因素会影响到信号, 即使是相同大小以及角度的缺陷都会有不同的信号, 扫描角度和缺陷长度方向的角度比较大时, 获得很好的检测效果, 并且探头的速度并不宜太大。可以看到物流无损检测在国防以及居民生活领域起着不可或缺的作用, 传统的试验方法耗费资源, 并且无法得知材料表面以及内部场的分布状况, 而合适的假设以及近似模型可以对实际的工件进行模拟仿真, 为实际应用提供了理论依据, 同时减少人力物力成本。本文研究进行了模拟涡流检测, 影响其电磁感应的因素包括不连续缺陷、电导率、提离效应以及厚度效应, 相比于其他无损检测方法, 涡流检测不使用耦合剂, 可以在高温条件下工作, 表面缺陷检测密度高, 提取不同的涡流影响因素, 可以检测各种属性参数, 同时检测到的信号易于进行数字处理以及结果显示^[9]。由于原位测量法成本高、分析复杂, 模拟仿真可以作为其补充, 并且可以定量的控制各

种可能影响到信号的因素, 从而更好地得出缺陷特征信号。考虑到铝在各种设备及零部件应用的广泛性, 本文通过建立多物理场模拟对比分析了人工预制缺陷和疲劳缺陷的不同尺寸的磁通量, 并详细探讨了其随时间的变化规律以及磁通密度 Z 分量与无缺陷作为对比的差分信号。研究结果验证了之前的实验结果, 实验结果表明在一定范围内, 检测信号幅值与缺陷深度以及高度呈现正相关的变化, 缺陷高度的变化正相关性更加明显, 差分信号峰值出现时间也一致^[10-11]。模拟结果证明了模型建立和参数设置的合理性, 通过模拟研究不同形状的缺陷造成的磁通密度, 对实际中金属材料的微裂纹和明显断裂起到预测的作用, 为避免各种条件下的铝中产生裂纹提供支持。

1 模型介绍

1.1 物理模型

本文利用 COMSOL Multiphysics 模拟仿真软件进行建模以及仿真计算, 图 1a 和 1b 分别为预制缺陷以及疲劳缺陷模型, 缺陷由红圈标出, 两种缺陷的模型尺寸也在模型图中标明。缺陷的尺寸要远小于模型的尺寸, 在实际中缺陷的尺寸为微米至毫米级别, 因为本研究主要针对缺陷尺度变化对磁通密度的影响, 故选取大范围的缺陷尺寸变化。缺陷深度为模型 y 轴方向, 缺陷的高度是模型 z 轴的方向。由于轴对称的特性, 该模型只建立了 1/4 部分。材料设置中, 待检测物体为铝制材料, 缺陷以及最外部长方体域设置为空气, 用来模拟产生的缺陷; 圆桶为激励线圈模型, 材料设置为铜, 线圈距离测试件为 0.4 mm, 该线圈设置为均质多匝模型, 线圈电导率为 6×10^7 S/m, 导线横截面积设置为 1×10^{-6} m², 施加激励电流 $I(t)$ 为分段函数, 如图 2 所示。



a. 预制缺陷模型

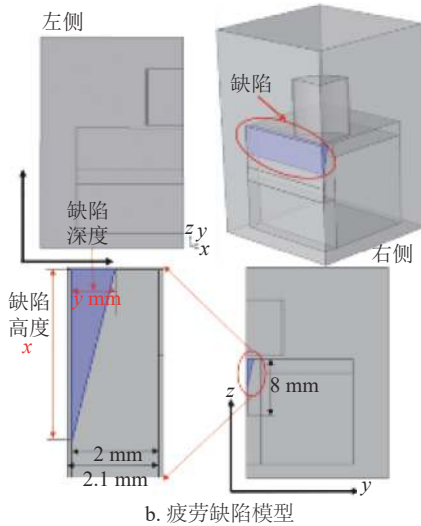


图 1 模型图

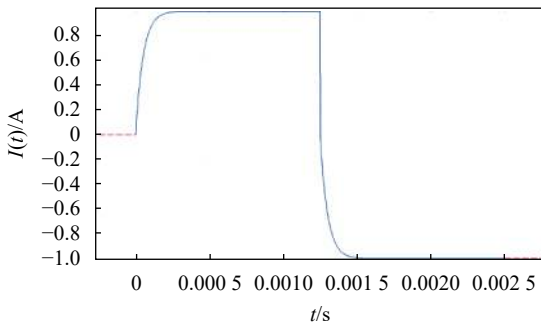


图 2 线圈所施加的分段激励电流函数

1.2 理论基础

该模型用 AC/DC 模块下的磁场 (mf) 接口, 该接口求解由磁向量势、电势作为独立变量的麦克斯韦方程组, 可以研究磁体、电动机、变压器以及携带静电或交流电的导体内部以及周围的电场以及磁场分布。模型中圆桶装置为多匝线圈模型, 该线圈为均质多匝线圈。当指定总电流为 I_{coil} , 施加外部电流密度为:

$$\mathbf{J}_e = \frac{NI_{\text{coil}}}{A} \mathbf{e}_{\text{coil}} \quad (1)$$

式中, N 为线圈匝数, 在本模型中设置线圈匝数为 200; A 为线圈域总的横截面积; \mathbf{e}_{coil} 为代表线圈线密度、长度以及平均横截面的向量场, 通过绘制该向量场可以观察线圈的方向。线圈所施加的总电流 I_{coil} 为分段函数, 所有的缺陷模型都使用该激励函数。

静电场安培定律方程为:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e \quad (3)$$

式中, \mathbf{J} 为电流; \mathbf{v} 为导体的速度; \mathbf{B} 为磁通量; \mathbf{J}_e 为外加电流密度:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (5)$$

式 (4) 为磁通密度 \mathbf{B} 与磁矢势 \mathbf{A} 之间的关系, 式 (5) 为磁通量的本构关系式, 式中 μ_0 为真空磁导率, \mathbf{H} 为磁场强度, \mathbf{M} 为磁化强度, 通过式 (4) 和式 (5) 推导出安培定律方程式为:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M}) - \sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e \quad (6)$$

通过求解以上数值方程, 设置材料以及边界条件, 求得在模型中的磁通密度的分布, 综合分析在时域上以及选取特定时间节点的磁通密度变化, 得出磁通密度 Z 和缺陷形状以及缺陷深度和高度之间的联系。

2 结果与讨论

2.1 预制缺陷模型

2.1.1 不同高度的影响

选取预制缺陷开口深度为 0.5 mm, 高度分别为 1、1.5、2、3、4 mm 的缺陷进行仿真。保证输入激励、材料、边界条件等其他参数相同, 得出了在线圈底部圆心处的时间-磁通密度 Z 分量以及磁通密度模在不同缺陷条件下的变化关系, 同时分析了其差分信号的变化。

图 3a 为无缺陷的情况下, 在时间 $t = 0.0015$ s 时, $z = 15$ mm 平面上磁通密度模的分布, 可以看到磁通密度模值主要分布在线圈底部, 其分布并没有太大的变化, 无缺陷时最大值为 1.25 T, 随着缺陷高度增加, 其值分别 1.23、1.22、0.70、0.58、0.59 T, 可以看到最大值并没有很规律的变化。图 3b 为线圈底部圆心处磁通密度 Z 分量随缺陷高度变化的规律, 对于其他缺陷模型也对该点的磁通密度 Z 分量数值变化进行分析。图 3c 为磁通密度 Z 分量与无缺陷磁通密度 Z 分量的 MATLAB 处理差分信号, 其他的缺陷模型也分析了其信号与无缺陷模型的差分信号。

由图 3b 对比可知, 磁通密度 Z 分量随时间变化的规律与图 2 线圈激励函数曲线变化规律一致, 在 0~0.00125 s 之间逐渐增加, 而在 0.00125~0.0025 s 之间逐渐减小。在 0.00125 s 之前, 随着缺陷高度的增加, 磁通密度 Z 分量首先增加, 后逐渐趋于一致, 在 0.00125 s 时发生了转折, 随后随

着缺陷高度的增加而变小, 之后趋于一致。这说明缺陷的存在对二次电场的产生起到阻碍的作用, 从而对原磁场的影响减弱, 故检测到的磁通密度 Z 分量随着高度的增加而增加。对于图 3c 中的差分信号, 可以看到无缺陷的差分信号并没有峰值的出现, 在 0.00125 s 之前, 随着缺陷高度的增加, 其峰值也随之增加, 而在之后呈现负增加的趋势。

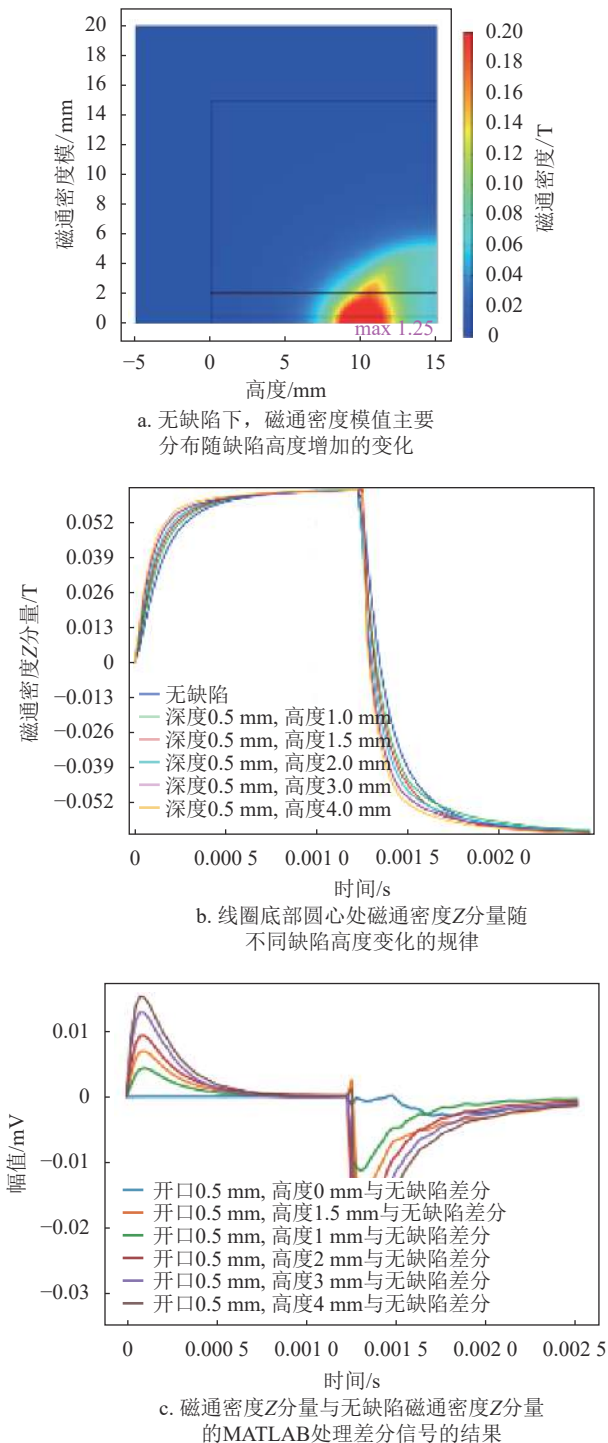


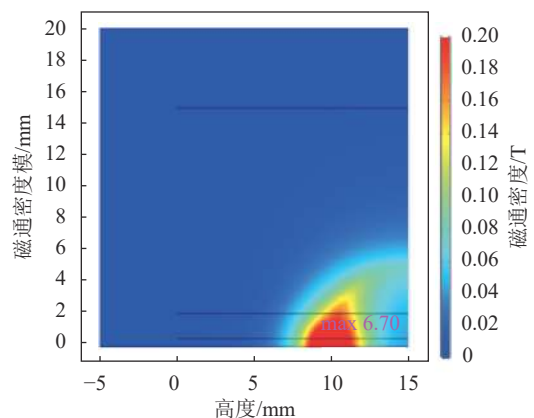
图 3 不同高度情况下预制缺陷磁通密度检测信号分析

2.1.2 不同深度的影响

选取预制缺陷高度为 2 mm, 深度分别为 0.5, 1、1.2、1.4、1.6、1.8、2 mm 的缺陷进行仿真。图 4a 为磁通密度模值在时间 $t = 0.0015$ s 时, $z = 15$ mm 平面上的分布情况, 可以看到相比于高度变化的模型, 其分布情况并没有太大的改变, 但是磁通密度模值变小了, 缺陷深度为 0.5 mm 时, 其最大值与高度变化对应缺陷的数值相同为 0.70 T, 同样随着缺陷深度的增加其值分别为 0.52、0.69、0.47、0.74、0.63、0.62 T, 可以看到最大值的变化并没有规律。

图 4b 为对应磁通密度 Z 分量随缺陷深度的变化而变化的情况。可以看到随着预制缺陷深度的增加, 磁通密度 Z 分量的变化与缺陷高度变化的趋势相同, 但其增加的数值相比缺陷高度变化时的小, 并且在 $t = 0.00125$ s 之前随着缺陷深度的增加其峰值附近的数值随着时间发生波动, 其中缺陷深度为 1.2 mm 以及 1.6 mm 时的波动较大, 而在 0.00125 s 之后, 其负增长的情况与缺陷高度变化时相同, 产生的数值波动也在磁通密度模最大值变化上反应出来。可以看到其峰值的变化规律并没有受到波动变化的影响, 该波动可能是由于 COMSOL 本身求解器误差所引起。

在产生预制缺陷之后, 随着缺陷高度以及深度的增加, 磁通密度 Z 分量有增大的趋势, 磁通密度模随之减小, 并且缺陷深度变化对磁通密度 Z 分量的影响与高度对其的影响不同, 差分信号峰值出现的时间均没有发生太大的改变, 可以根据磁通密度 Z 分量以及差分信号的变化规律来对缺陷的类型进行预判。



a. 在 $Z = 15$ mm 平面 $t = 0.0015$ s 时选取预制缺陷深度为 0.5 mm 时磁通密度模分布情况

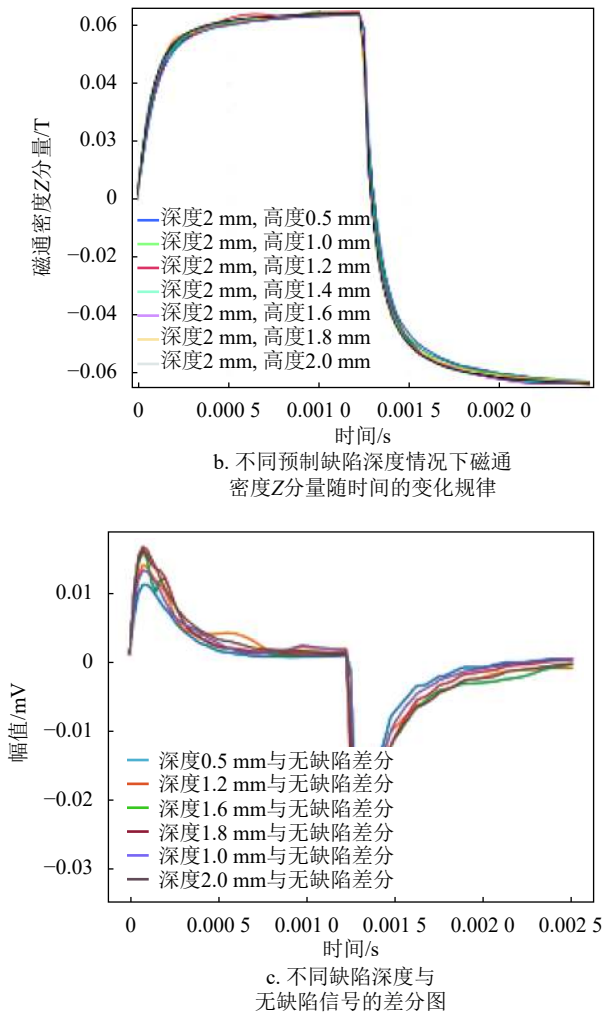


图 4 不同深度情况下预制缺陷磁通密度检测信号分析

2.2 疲劳缺陷模型

2.2.1 不同高度的影响

设置疲劳缺陷的材料、激励、边界条件等参数与预制缺陷一致。图 5a 为疲劳缺陷高度为 4 mm, 时间 $t = 0.0015$ s, $z = 15$ mm 的平面上的磁通密度模值的分布, 相比于预制缺陷, 其分布并不连续, 并且其最大值为 0.32 T, 随着缺陷高度的增加其最大值分别为: 0.38、0.33、0.31、0.36 T, 可以看到其最大值的变化并不规律, 说明缺陷以及材料性质对磁通密度模值的影响存在不确定性因素。

图 5b 为疲劳缺陷高度不同时, 线圈底部圆心处的磁通密度 Z 分量随时间的变化情况。和预制缺陷变化趋势一致, 在 $0 \sim 0.00125$ s 时, 磁通密度 Z 分量值逐渐增大, 随着高度的增加其值也随之增加, 但是并没有趋于一致。激励在 $t = 0.00125$ s 处变换函数, 磁通密度 Z 分量也随之变化, 随着时间增加其值负增加。图 5c 为磁通密度 Z 分量的差分信号, 可以看到其前段峰值逐渐增加, 但后端峰值

并没有逐渐增加的趋势, 4~6 mm 峰值几乎没有变化, 7、8 mm 峰值相同, 之后差分信号随着缺陷高度的增加而增加, 可以看到第一个峰值出现时间一致, 而第二个峰值出现的时间有所差异。

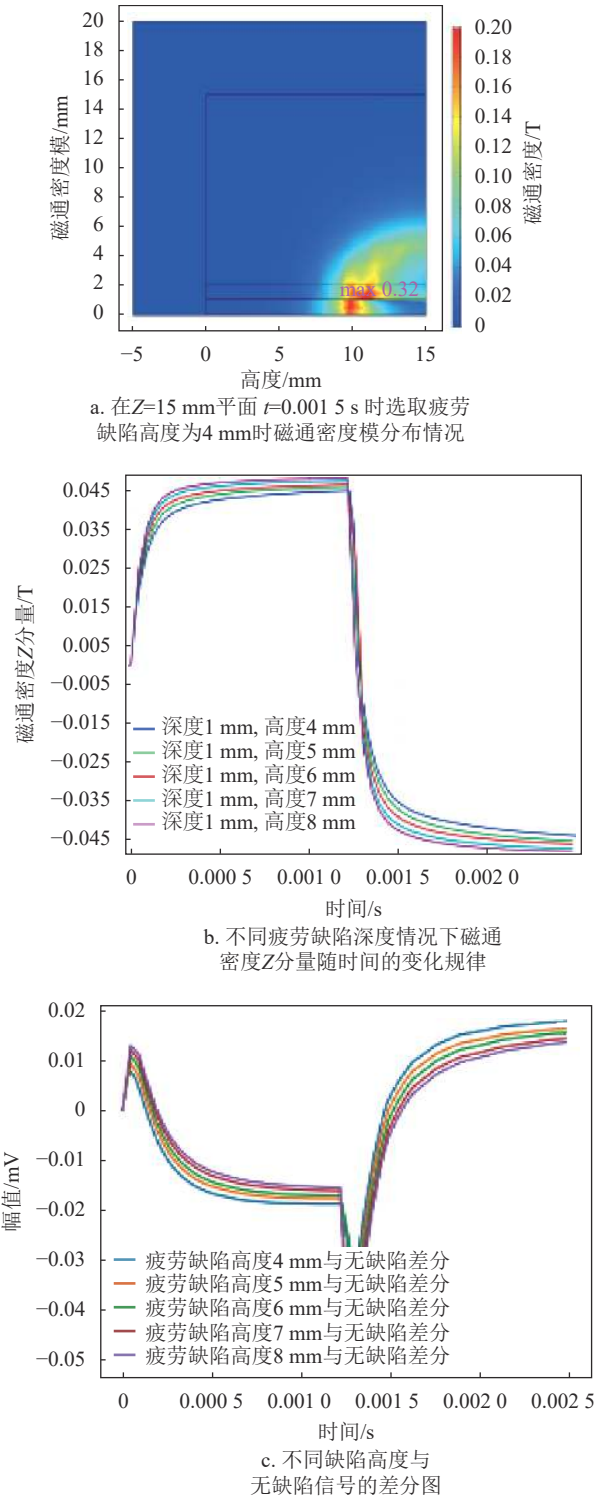


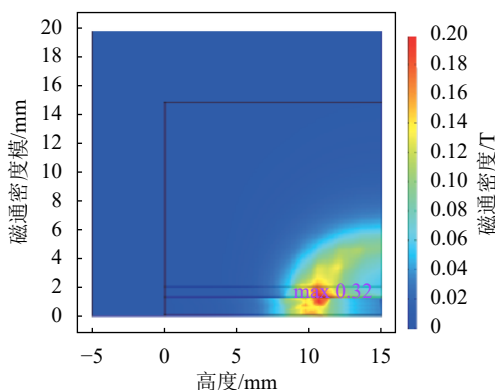
图 5 不同高度情况下疲劳缺陷磁通密度检测信号分析

2.2.2 不同深度的影响

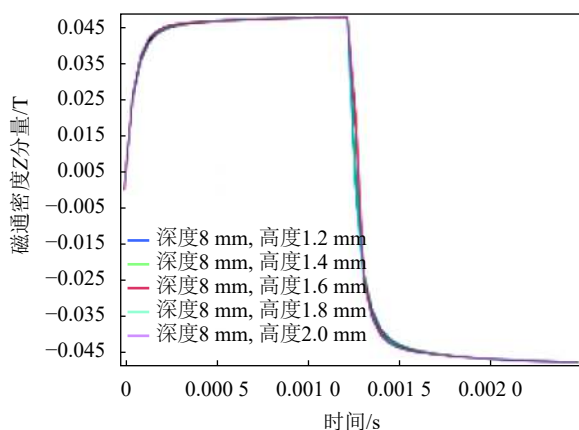
如图 6a 为磁通密度模值在缺陷深度为 1.2 mm

时的分布情况, 其最大值为 0.34 T, 随着缺陷深度的增加, 其分布并没有明显的变化, 其最大值随着深度的增加分别为: 0.40、0.39、0.35、0.46 T, 可以看到随着缺陷深度的增加其最大值并没有规律的变化。如图 6b 所示, 与预制缺陷深度变化的情况相似, 磁通密度 Z 分量并没有随着缺陷深度的增大而发生太大的变化, 但是从图 6c 可以看出大差分信号负的峰值随着缺陷的加深, 有着明显的负增加, 但正峰值以及其他时间段并没有太大变化, 峰值出现的时间并没有太大的变化。这是由于在轴向上缺陷的影响更加明显, 而在深度方向上, 缺陷对涡流场并没有太大的影响。

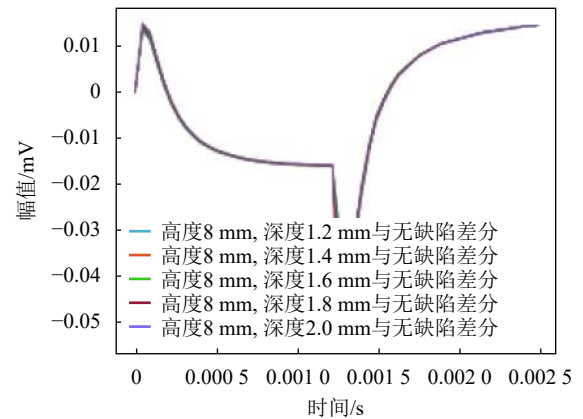
可以看到疲劳缺陷与预制缺陷在差分信号上有相似的变化规律, 其中峰值的出现时间几乎没有变化, 疲劳缺陷差分信号在峰值处出现突变转折, 而对于预制缺陷其峰值处为平滑过渡转折, 由此可以判断疲劳缺陷的存在。再根据差分信号可知, 缺陷的高度增加, 其负峰值随之增加, 可以预判其缺陷的大小。所以根据差分信号与缺陷深度与高度的关系, 可以为缺陷的类型以及尺寸提供定量分析的依据。



a. 在 $z=15$ mm 平面 $t=0.0015$ s 时选取疲劳缺陷深度为 1.2 mm 时磁通密度模分布情况



b. 不同疲劳缺陷深度情况下磁通密度 Z 分量随时间的变化规律



c. 不同疲劳缺陷深度与无缺陷信号的差分图

图 6 不同深度情况下疲劳缺陷磁通密度检测信号分析

3 结束语

本文通过建立预制以及疲劳缺陷模型, 线圈通以脉冲激励源, 研究了不同缺陷高度以及深度情况下同一点处的磁通密度 Z 分量随时间变化而变化的情况, 提取并分析了差分信号, 同时研究了磁通密度模值在 $z=15$ mm 截面处, 选取时间 $t=0.0015$ s 时的分布, 研究发现磁通密度模值分布随着缺陷深度以及高度的变化并没有太大的变化, 并且其最大值没有规律性。在电流的上升沿以及下降沿, 随着缺陷高度的增加磁通密度 Z 分量逐渐增大; 并且对于预制缺陷在上升沿以及下降沿, 磁通密度 Z 分量随着缺陷高度增加的同时数值趋于同一值, 而疲劳缺陷则没有出现该情况。预制以及疲劳缺陷深度变化对磁通密度 Z 分量的影响较小, 而预制缺陷在电流上升沿和下降沿呈现较大的波动变化。对差分信号分析结果表明, 预制缺陷与疲劳缺陷在峰值附近变化方式不同, 缺陷高度变化对信号的影响更大。实验结果有助于加深对缺陷检测机理的理解, 为实际检测提供了一定的理论支持。

参考文献

- [1] 任吉林, 林俊明, 高春法. 电磁检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
REN Ji-lin, LIN Jun-ming, GAO Chun-fa. Electromagnetic testing[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [2] 周在祀. 金属表面裂纹深度微波检测法[J]. 无损检测, 1991, 13(12): 331-333.
ZHOU Zai-si. Microwave detection of crack depth on metal surface[J]. Nondestructive Testing, 1991, 13(12): 331-333.
- [3] 赵庆玲, 马超, 段滋华. 金属断裂与表面裂纹微波检测法[J]. 太原工业大学学报, 1996, 27(2): 95-99.
ZHAO Qing-ling, MA Chao, DUAN Zi-hua. Microwave detection of metal fracture and surface crack[J]. Journal of

- Taiyuan University of Technology, 1996, 27(2): 95-99.
- [4] SHAFFER R D. Eddy current testing, today and tomorrow[J]. *Materials Evaluation*, 1994, 52(1): 28-32.
- [5] 陈新波, 孙金立. 某型飞机轮舱支臂耳片裂纹的原位涡流探伤[J]. *无损探伤*, 2010, 34(4): 37-38.
CHEN Xin-bo, SUN Jin-li. In situ eddy current testing for the crack in the ear lobe of the wheel cabin of a certain aircraft[J]. *Nondestructive Testing*, 2010, 34(4): 37-38.
- [6] 陈新波, 李小丽, 杨青波. 舰载直升机主桨毂轴颈缺陷的涡流检测[J]. *无损检测*, 2019, 41(5): 18-21.
CHEN Xin-bo, LI Xiao-li, YANG Qing-bo. Eddy current testing of main rotor hub neck defects of shipborne helicopter[J]. *Nondestructive Testing*, 2019, 41(5): 18-21.
- [7] NAFIAH F, SOPHIAN A, KHAN M R, et al. Quantitative evaluation of crack depths and angles for pulsed eddy current non-destructive testing[J]. *NDT & E International*, 2019, 102: 180-188.
- [8] ZHANG W M, XU M D, GAO X Y, et al. Eddy current testing for blade edge micro cracks of aircraft engine[C]//Conference on the Applied Optics and Photonics China. Beijing, China: [s.n.], 2017: 1045806.1-1045806.7.
- [9] 李超. 电涡流检测互感式探头信号的理论建模研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
LI Chao. Research on theoretical modeling of mutual inductance probe signal for eddy current detection[D]. Xuzhou: University of Mining and Technology of China, 2018.
- [10] YU Ya-ting, GUAN Jia. Investigation of signal features of pulsed eddy current testing technique by experiments[J]. *Non-Destructive Testing and Condition Monitorin*, 2012, 55(9): 487-491.
- [11] YU Ya-ting, YUE Yan, FEI Wang, et al. An approach to reduce lift-off noise in pulsed eddy current nondestructive technology[J]. *NDT & E International*, 2014, 63: 1-6.

编辑 叶芳