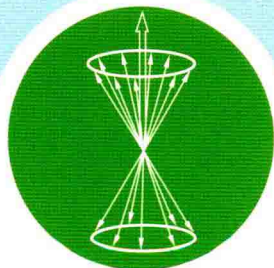


THEORY AND
METHOD
OF MAGNETIC FLUX
LEAKAGE
IMAGING



漏磁成像理论与方法

黄松岭 赵伟 著

Huang Songling Zhao Wei

清华大学出版社

5.28

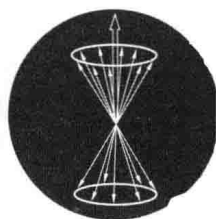
THEORY AND
METHOD
OF MAGNETIC FLUX
LEAKAGE
IMAGING

漏磁成像理论与方法

黄松岭 赵伟 著

Huang Songling

Zhao Wei



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

漏磁检测缺陷反演成像理论与技术是近年兴起的研究热点,国内外学者通过大量卓有成效的研究工作,取得了显著的理论成果并进行了工程应用。本书系统介绍了漏磁检测基本原理、缺陷识别与量化理论及其实现技术,主要包括漏磁检测影响因素、检测信号处理方法、缺陷当量尺寸量化方法、缺陷轮廓反演、三维漏磁成像等内容。

本书是作者对漏磁检测缺陷反演与成像理论的系统梳理,作者汇集了十多年来的科研与技术应用成果,对于高校师生和从事无损检测技术的工程人员极具参考价值。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

漏磁成像理论与方法/黄松岭,赵伟著.--北京:清华大学出版社,2016

(电子信息与电气工程技术丛书)

ISBN 978-7-302-43659-1

I. ①漏… II. ①黄… ②赵… III. ①漏磁场—电磁检验—缺陷检测 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 084781 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:时翠兰

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:11

字 数:270 千字

版 次:2016 年 8 月第 1 版

印 次:2016 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.00 元

产品编号:069091-01

前言

漏磁检测具有原理简单、工程应用方便和对被检测工件表面要求不高等诸多优点,因此,从其诞生开始的近一百年时间里,漏磁检测技术得到了长足发展,其应用领域拓展到石油、化工、汽车、航空航天、铁路和轮船等几乎覆盖人们生产生活所涉及的全部行业,既包括原材料毛坯的探伤,又包括工厂生产线上的工件成品、半成品质量控制和在役设施缺陷检测与安全评估。

长期以来,缺陷反演量化一直是漏磁检测的难点和研究热点,近几十年,漏磁检测缺陷量化反演技术经历了由简单到复杂、由定性识别到定量分析的发展历程,并朝着缺陷轮廓识别和漏磁成像检测方向发展。

本书介绍漏磁检测基本原理、缺陷识别与量化理论及其实现技术,主要包括漏磁检测影响因素、检测信号处理方法、缺陷当量尺寸量化方法、缺陷轮廓反演和三维漏磁成像等几个方面内容。

本书的内容是作者十多年来在漏磁无损检测理论方面不断研究和实践应用的总结,书中大部分内容来源于作者指导的博士和硕士研究生的学位论文,这些学生是崔伟、陈俊杰、童允、刘新萌、苏志毅和吴欣怡等。在相关技术的实施中,得到了中石化、中石油和中海油等相关单位领导和工程技术人员的大力协助,使得该理论和技术在实践中不断完善,在此表示衷心的感谢!

在国外,漏磁无损检测技术研究较早,国外的有些技术至今仍垄断着国内的市场。随着国内无损检测需求的增长,我国对漏磁无损检测技术的研究工作越来越得到重视,工业应用也越来越广泛,希望本书的出版能为广大的研究开发人员、高校师生和工程技术人员提供参考。书中若有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

作者于清华园

2016年6月

第 1 章	绪论	1
1.1	引言	1
1.2	漏磁检测影响因素	2
1.2.1	磁化的影响	2
1.2.2	检测过程的影响	7
1.3	漏磁检测缺陷量化反演技术研究现状	9
1.3.1	MFL 检测理论与技术发展	9
1.3.2	缺陷量化反演技术研究	11
1.3.3	MFL 检测缺陷量化反演仍需解决的问题	13
第 2 章	检测信号处理方法	16
2.1	数据采集与存储	16
2.1.1	漏磁检测的数据采集	16
2.1.2	数据的组织与存储	17
2.2	数据压缩及降噪方法	18
2.2.1	检测数据压缩	18
2.2.2	检测信号降噪方法	21
第 3 章	漏磁检测缺陷量化方法	28
3.1	引言	28
3.2	基于统计识别的缺陷量化方法	33
3.2.1	漏磁信号的预处理	33
3.2.2	波形特征的定义和提取	34
3.2.3	缺陷长度的统计识别	35
3.2.4	多变量统计分析方法	37
3.2.5	缺陷宽度的统计识别	39
3.2.6	缺陷深度的统计识别	41
3.3	径向基函数神经网络量化方法	42
3.4	三维有限元神经网络量化方法	49
3.4.1	有限元法的离散化原理	50
3.4.2	有限元神经网络	51
3.4.3	用 FENN 求解正问题和逆问题	57
3.4.4	FENN 的优点分析	59
第 4 章	三维漏磁检测缺陷轮廓反演	62
4.1	三维漏磁信号特性	62
4.1.1	信号的基本特征	63

目录

4.1.2	信号随缺陷尺寸的变化规律	65
4.2	缺陷三维轮廓的随机搜索迭代反演方法	66
4.2.1	待求解区域的分段识别	66
4.2.2	缺陷开口轮廓检测方法	70
4.2.3	缺陷三维轮廓网状模型	73
4.2.4	缺陷三维轮廓的随机搜索迭代反演	75
4.3	缺陷三维轮廓的神经网络迭代反演方法	91
4.3.1	三维 MFL 检测信号的主要特征值提取	91
4.3.2	缺陷三维轮廓条状模型	98
4.3.3	基于 RBF 神经网络的 MFL 信号正向预测	100
4.3.4	缺陷三维轮廓的 RBF 神经网络迭代反演	107
4.4	缺陷三维轮廓的多阶段逐次逼近反演方法	113
4.4.1	缺陷轮廓的多阶段复合反演	113
4.4.2	缺陷网状模型的逐步细化	116
4.4.3	有限元计算剖分尺寸的逐步细化	119
4.4.4	实际缺陷三维轮廓反演实验	123
4.5	采样精度对缺陷三维轮廓反演的影响与修正	128
4.5.1	采样精度的影响分析	128
4.5.2	三维 MFL 信号的插值修正方法	130
4.5.3	实验验证	132
第 5 章	三维漏磁成像检测	135
5.1	三维漏磁信号特征量值	135
5.1.1	凹坑缺陷的参数定义	136
5.1.2	水平沟槽缺陷的参数定义	137
5.1.3	切向沟槽缺陷的参数定义	139
5.2	完整信号下的缺陷分类量化方法	141
5.2.1	基于 RBF 神经网络的缺陷分类方法	141
5.2.2	基于 BP 神经网络的缺陷量化方法	144
5.3	不完整信号下的缺陷量化与显示方法	154
5.3.1	缺陷边缘识别	154
5.3.2	缺陷深度估计	161
5.3.3	不完整信号下的缺陷实时显示	164
参考文献		169

1.1 引言

缺陷漏磁检测的原理如图 1.1 所示。

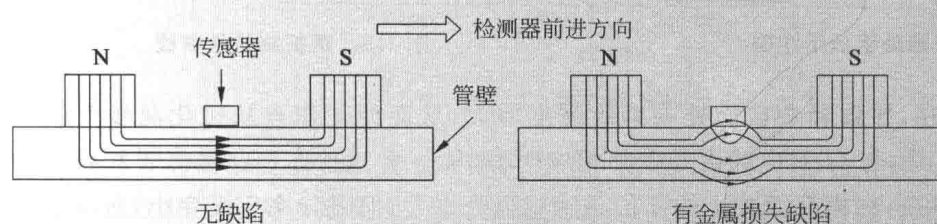


图 1.1 缺陷漏磁检测原理

漏磁检测法是建立在铁磁性材料的高磁导率特性基础上的。铁磁性材料被外加磁场磁化,若铁磁性材料的材质是连续、均匀的,则材料中的磁力线将被约束在材料内部,几乎没有磁力线从材料的表面穿出。但当材料的表层或内部存在缺陷时,由于缺陷位置的磁导率小,磁阻很大,磁力线将会改变路径。大部分改变路径的磁通将优先从磁阻较小的材料内通过。当材料内部的磁感应强度比较大或缺陷尺寸较大时,缺陷附近的材料难以接受更大的磁通,部分磁通会从缺陷的部位溢出工件,穿越缺陷上方的空气后再进入工件,在工件外形成漏磁通。在这里,铁磁性材料的磁场强度与泄漏的磁力线的强弱直接相关。在外磁场作用下,铁磁性材料的磁感应强度 $\vec{B}$ 和磁场强度 $\vec{H}$ 的关系为

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1-1)$$

由于材料的磁导率也是一个随磁场强度 $\vec{H}$ 变化的量,所以 $\vec{B}$ 与 $\vec{H}$ 的关系不是线性的,而是呈现出非线性变化的磁化曲线。被测材料被永久磁铁或励磁线圈磁化,均符合该磁化规律。

这里以表面存在缺陷的钢板为例说明漏磁现象。图 1.2 为钢板缺陷的剖面,图 1.3 为钢板的磁特性曲线。

设钢板上某缺陷的截面积为 S_a ,钢板截面积为 S ,则缺陷区域钢板的剩余截面积为 $S-S_a$ 。若磁化场是磁场强度为 H 的均匀磁场,无缺陷处钢板内的磁感应强度为 B_1 ,对应于 $B-H$ 曲线的工作点为 Q ,而 Q 点对应

磁导率曲线 1 上的 P 点。

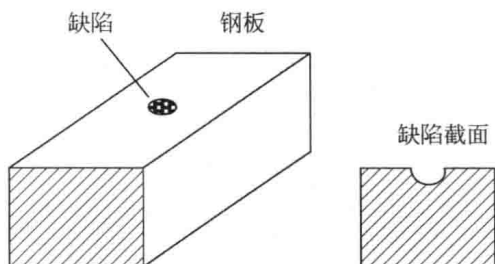


图 1.2 缺陷处钢板示意图

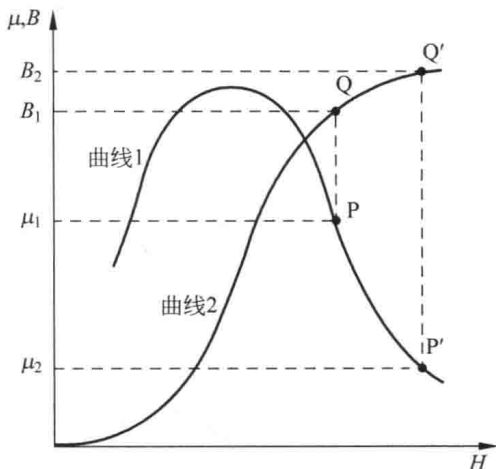


图 1.3 钢板磁特性曲线

由于缺陷的存在,导致剩余截面处磁感应强度增大,从而使工作点从磁化曲线上的 Q 点移动到 Q'点。但是,与 Q'对应的磁导率却相应变小,从曲线 1 上的 P 点移动到 P'点。换言之,由于缺陷的存在,在横截面减小的部位磁感应强度增大,但磁导率反而变小,造成了钢板存在缺陷的部位无法通过原先的磁通量,从而使得一部分磁力线散漏到周围的介质中,形成漏磁场。

1.2 漏磁检测影响因素

腐蚀缺陷的漏磁场会受到很多因素的影响,包括被测件的磁化强度和剩磁、被测件的材质(导电性和导磁性)、磁场耦合回路(如用于耦合磁场到被测件中的钢刷)、磁极间距、检测器的扫查速度和被测件应力变化,等等。

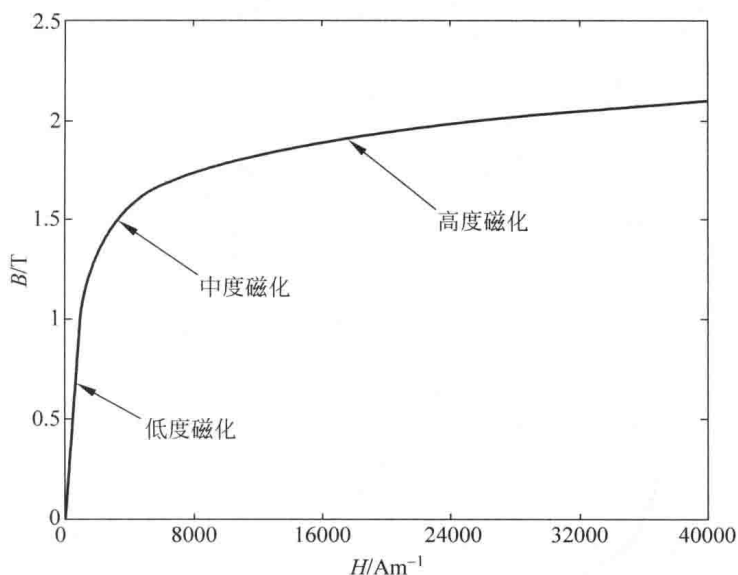
1.2.1 磁化的影响

检测器中磁化系统的作用是对被测件进行磁化,进而在缺陷周围产生漏磁场,外加磁场强度对被测件磁化水平的影响最大。外加磁场强度主要取决于磁化系统和被测件之间的关系,而被测件厚度、被测件材质、检测器扫查速度和剩磁等因素,均会对其产生不同程度的影响。

外加磁场强度与被测件中磁感应强度的关系是非线性的,如图 1.4 所示。

被测件被永磁体磁化后,能否在缺陷处产生漏磁场,主要取决于被测件的磁化强度。如果磁化强度不够,那么,缺陷处减薄的壁厚仍可能承载全部的磁通,这样就不会有磁通泄漏到被测件表面。因此,只有当存在缺陷和磁导率随外加磁场强度增大而降低(即被测件磁化强度达到饱和)这两个条件同时满足时,才能确保产生缺陷漏磁场。

但值得注意的是,磁化强度又不能过度饱和,因为这会使空气耦合磁场增大,导致缺陷信号的信噪比降低,进而降低分辨缺陷的能力。

图 1.4 管壁的 $B-H$ 曲线

外加磁场的强度主要取决于磁铁的磁性。图 1.5 显示了通过有限元计算得到的不同外加磁场强度在一个腐蚀缺陷处产生的漏磁场信号。外加磁场的强度分别为 1.8T、1.6T、1.2T 和 0.6T。缺陷的长度、宽度和深度分别为 14.6mm、14.6mm 和 7.3mm(50%壁厚)。0.6T 对应较低的磁化强度,1.2T 和 1.6T 对应中等磁化强度,1.8T 对应较高的磁化强度。

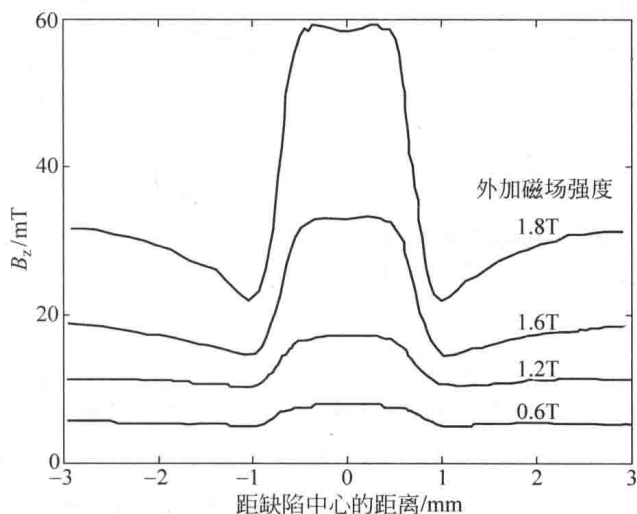


图 1.5 磁化强度对同一缺陷的漏磁场信号的影响

由图 1.5 可以看出,探头测得的信号实际上包含两个部分:背底磁场信号和缺陷漏磁信号。当被测件磁感应强度为 1.8T 时,背底磁场的磁感应强度幅值为 32mT,而探头测得信号的磁感应强度总幅值为 58.5mT,这样,缺陷漏磁信号的磁感应强度幅值为 $58.5 - 32 = 26.5$ mT。缺陷漏磁信号与背底磁场信号之比约为 0.8。当被测件磁感应强度为 0.6T 时,漏磁信号的磁感应强度幅值仅为 2mT,与背底磁场的磁感应强度幅值之比约为 0.3。这里,背底磁场指的是在被测件没有缺陷时探头测得的磁感应强度直流信号,主要源自于磁极间

通过空气耦合的磁场(以下简称为空气耦合磁场),如图 1.6 所示。

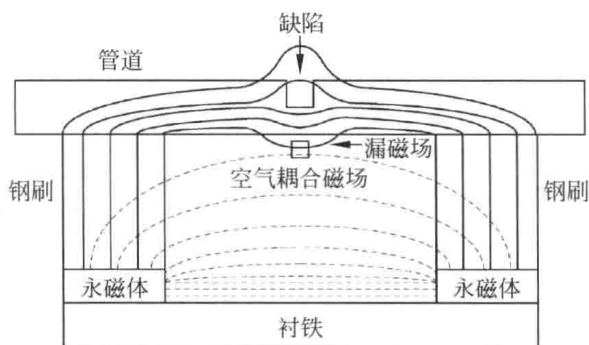


图 1.6 空气耦合磁场示意图

这样,通过比较不同外加磁场强度下缺陷漏磁信号与背底磁场的比值,可以看出外加磁场强度对漏磁检测的影响。从图 1.6 可以看出,在被测件磁感应强度为 1.8T 时,这个比例最高。而且,随着磁场强度的减小,这个比例逐步降低。当外加磁场强度低于 1.2T 时,这个比例将会减少到一个基本固定的值。但是,如果磁化强度在 1.8T 的基础上进一步提高,缺陷漏磁信号与背底磁场的比值则呈下降趋势,这主要是因为缺陷漏磁信号幅值在被测件磁感应强度达到饱和之后基本不再发生变化,而背底磁场仍会随着外加磁场的提高而持续提高,从而导致两者的比值降低。

综上所述,达到或者适度超过饱和磁化强度的外加磁场会产生足够大的漏磁通,已可以确保对腐蚀缺陷的有效检测。因此,为了提高腐蚀缺陷漏磁检测和量化的精度,应当选择较高的外加磁场强度,以确保被测件磁化强度达到适度饱和,获得足够高的缺陷漏磁场与背底磁场比值。需要注意的是,外加磁场强度也不能过高,因为过高的磁化场强度会导致信噪比的降低。

因为磁化场强度会影响检测和量化,所以影响磁化场强度的因素同时也会影响检测和量化。影响检测与量化的主要因素包括以下几个。

1. 被测件厚度

被测件的厚度越大,达到饱和磁化水平所需要的外加磁场越强。在外加磁场强度不变的情况下,被测件厚度的变化与被测件内磁场强度和磁感应强度呈相反的线性关系。设被测件厚度 T 分别为 9.5mm、12.7mm、14.6mm、17.5mm、21mm、26.2mm、30.4mm 和 32mm,在磁化场强度不变的情况下,利用有限元法求得距离被测件表面 4mm 处的磁感应强度的变化趋势如图 1.7 所示。

从图 1.7 可以看出,被测件厚度与磁感应强度呈明显的负向线性关系,即被测件越厚,被测件内磁感应强度就越小。因此,在设计永磁体的磁性参数时,必须考虑待测件的厚度。

2. 被测件材质

由于碳含量变化、合金材料和杂质等原因,被测件的磁导率会发生变化,进而影响其磁化强度。材质的影响可以通过使用较强的磁化场,让被测件磁化强度达到饱和而消除。对于有些需要使用中等磁化水平的检测系统,磁导率的变化将会导致缺陷漏磁信号不一致,难

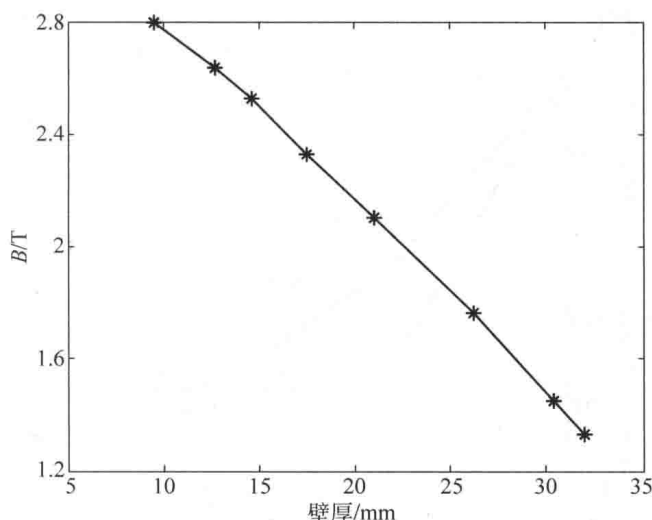


图 1.7 壁厚与磁感应强度的关系

以进行有效的评估和分析。

3. 耦合回路

在磁化系统中,钢刷被用于将磁通耦合到被测件中。磁化器和被测件之间的耦合效率会对被测件内的磁感应强度产生一定的影响。较短的钢刷可以提供较高的耦合效率和更高的磁场强度,但较长的钢刷则可以提高检测器在被测件内行进的通过能力。

4. 磁极间距

较短的磁极间距可以产生较高的磁化强度,而且便于通过曲度较小的狭窄空间,但是会导致磁场的均匀性降低。较长的磁极间距可以提供较为均匀的磁场,但是会降低磁化强度,因为被测件磁极间的磁阻会随着磁极间距的增大而增大,因而需要磁性更强的磁铁,以便使被测部位达到饱和。

5. 剩磁

剩磁指的是因过去曾进行漏磁检测而在被测件中残留的磁场。剩磁会影响当前检测的磁化水平,尤其是在被测件磁化水平较低或者中等的情况下。

剩磁会降低被测件的磁感应强度,从而影响对缺陷的检测和量化。铁磁性材料在磁化之后会显现出磁滞效应,即外加磁场去除之后,被测件内仍然会残留一定的磁感应强度。当再次施加外加磁场时,磁化曲线将从等于 0 的外加磁场强度和等于剩磁的磁感应强度开始,因此会产生一条新的磁化曲线。磁化曲线不仅是非线性的,而且每次重新磁化所得到的都会有所不同。

对相同长宽、不同深度的缺陷进行多次漏磁检测的结果如图 1.8 所示,从中可以看出两个重要的变化。首先,在每次检测之后,漏磁信号强度都有所降低。其次,随着检测次数的增多,漏磁信号强度的变化幅度将越来越小。因为这时被测件已经因为剩磁的存在而达到饱和,所以即使外加磁场变化很大,被测件中的磁感应强度也不会有明显的变化,因而漏磁

场信号也不会有很大变化。

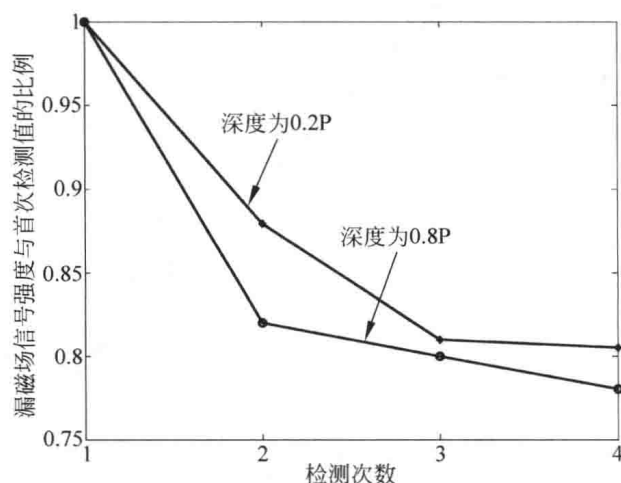


图 1.8 剩磁对漏磁场的影响

在检测器磁化强度较低时,剩磁对管道内磁感应强度的影响较大。管道经过一次漏磁检测后,磁性会在管道内残留很长一段时间。进行下次漏磁检测时,如果检测器磁化强度较低,剩磁会叠加在新加的磁场上,影响缺陷漏磁场的幅度。但是如果待测管壁的磁化强度达到近饱和水平,剩磁的影响就较小。因此,如果检测器将管壁磁化到饱和状态,剩磁的影响可以忽略。

6. 应力

被测件应力会影响其导磁性,进而对被测件磁化强度和缺陷周围磁感应强度产生影响,使磁力线分布产生畸变,严重影响检测效果。在磁化水平较低的情况下,应力对被测件内磁感应强度的影响较为严重,如图 1.9 所示。若将被测件磁化至饱和状态,可以忽略应力引起的变化。

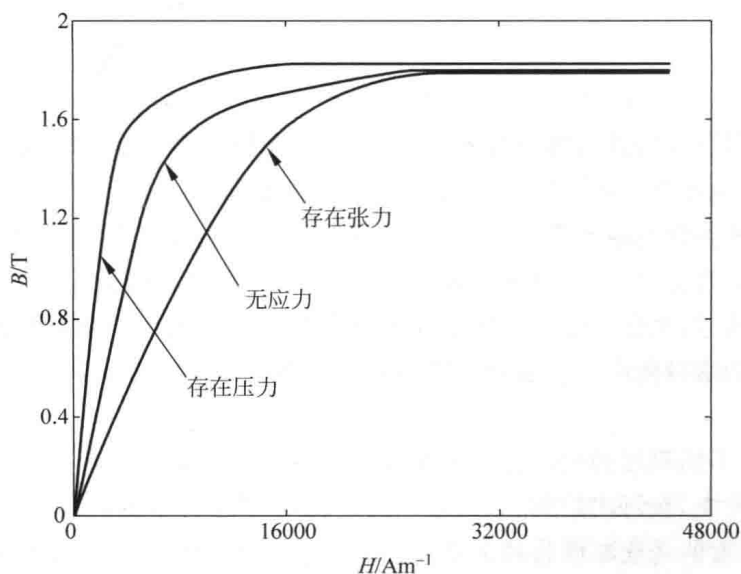


图 1.9 应力对磁化强度的影响

综合上述结论,对于腐蚀检测而言,应当使用较高的磁化水平,使被测件磁化强度达到适度的饱和水平,从而有效地减小材质变化、磁极间距、扫查速度和应力对被测件磁化强度和漏磁场信号的影响。

1.2.2 检测过程的影响

1. 扫查速度

漏磁检测器扫查速度的增加,会使缺陷产生的漏磁通明显减少,其影响程度取决于速度大小和缺陷的外形参数。在对缺陷检测精度的要求较高时(如要检出深度小于10%壁厚的缺陷),就要考虑速度的变化。在不同速度下,对不同深度的缺陷进行仿真,结果如图1.10所示。

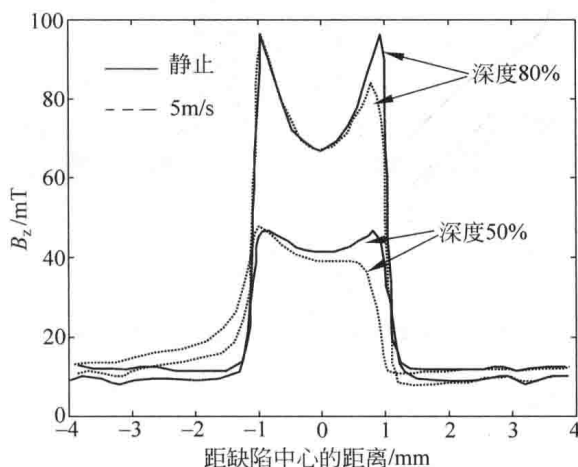


图 1.10 速度对漏磁场的影响

从图1.10可以看出,速度对漏磁信号的影响主要表现在以下几方面:

- (1) 速度增加会减小漏磁信号的幅值;
- (2) 速度增加会改变漏磁信号前后端的形状,波形两端的谷底值不等;
- (3) 使漏磁信号整体向磁极移动的反方向倾斜;
- (4) 速度增加,对深度较大缺陷(80%壁厚左右的缺陷)的漏磁场影响较小,但对深度较小缺陷(20%壁厚左右的缺陷)的漏磁场影响较大。

在图像处理技术领域,对由于被测目标移动或者图像采集仪器运动导致的图像模糊,常用的处理方法是利用二维傅里叶变换获取图像的不变特征,进而消除移动速度的影响。因为漏磁信号是一维的时间序列,所以可利用一维傅里叶变换,设计信号重构滤波器,进行信号波形的反演,从而消除速度的影响。

2. 探头提离高度

当探头在被检测表面扫查时,探头提离被测件表面的高度值(以下简称提离值)会发生变化。提离值的变化或称波动,可被看作干扰信号,它会对检测结果带来不利影响,因而需加以抑制。

对一个典型的金属腐蚀缺陷进行仿真计算,仿真模型所采用的结构参数包括:管道内径 1016mm、管道壁厚 14.6mm、管道检测器的两永磁体即两磁极中心之间的距离 1000mm、磁极与管壁之间的距离(即钢刷长度)500mm、缺陷深度 7.3mm、长度和宽度均为 10mm、探头的提离值 0.5~16mm(从小到大依次取 12 个值)。图 1.11 为不同提离值下,仿真计算得到的漏磁感应强度。其中,定义漏磁场轴向分量为 B_z ; B_z 的最大值和最小值之间的差值为 B_{zp-p} 。为简便起见,也称 B_{zp-p} 为漏磁场峰谷值。图 1.12 为提离值与漏磁场峰谷值之间的关系曲线。

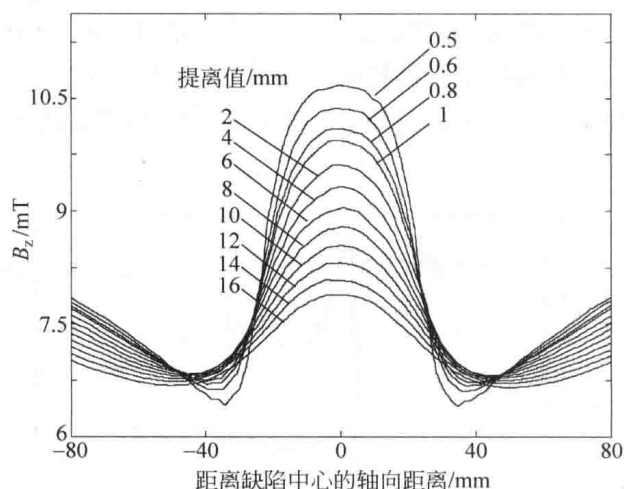


图 1.11 不同提离值得到的漏磁感应强度曲线

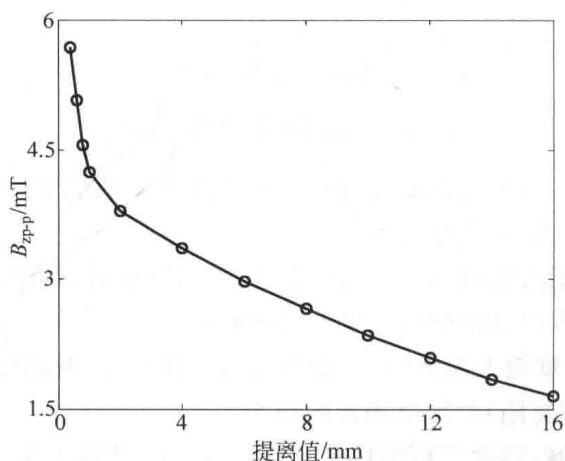


图 1.12 漏磁场峰谷值与提离值的关系

从图 1.12 可见,漏磁场峰谷值随提离值的增大迅速降低。因此,为了提高检测灵敏度,提离值应当越小越好。但是,在探头的检测灵敏度达到检测要求的前提下,对提离值的选择,应以最大限度地减小检测误差为原则。在实际检测中,探头的提离值常因为工件表面存在缺陷、焊缝及原本的不平顺等而有波动。这种波动无疑会对检测到的漏磁场信号产生负面影响,造成相应的检测误差。

1.3 漏磁检测缺陷量化反演技术研究现状

1.3.1 MFL 检测理论与技术发展

1934年,世界首台具有多向磁化功能的磁力设备 Magnaflux A-300 诞生,MFL 检测技术正式进入工业应用。经过 80 余年的不断发展,MFL 检测的应用领域已从最初的钢材检测,逐步扩展到了油气管道检测、铁路钢轨检测、储罐底板检测、桥梁拉索检测和钢丝绳断线检测等众多领域。

1. 漏磁理论与计算方法

基于解析法的漏磁(MFL)检测基础理论研究已经较为完善。Mandache C. 等人建立了 MFL 检测表面破裂缺陷的解析模型,可对缺陷 MFL 信号进行准确的预测。Melikhov Y. 等人推导了外加磁场内任意角度表面缺陷对应 MFL 信号的解析表达式,可实现 MFL 检测信号的快速计算。武新军、康宜华等人对 MFL 检测的磁性机理进行研究,分析了漏磁信号从铁磁性材料中泄漏的完整过程。同时,该组研究人员基于磁偶极子原理,建立了任意缺陷方向与传感器检测方向下的 MFL 检测信号计算模型,对 MFL 信号受缺陷方向与检测方向的影响进行了理论分析。Dutta S. M. 等人建立了以磁偶极子为基础的 MFL 检测解析模型,研究了 MFL 信号的空间尺度不变性、信号受提离值的影响以及信号对缺陷参数的灵敏度。Mandal K. 等人基于理论计算模型,研究了 9mm 钢管壁上 50% 深度电化学腐蚀坑的 MFL 检测信号特性,进而研究了管线压力引起的周向应力对 MFL 检测信号的影响。解析法的计算效率高,但其仅适用于具有规则形状的缺陷,难以应用于实际油气管道中不规则形状缺陷的 MFL 信号计算。

20 世纪 70 年代起,数值计算方法在电磁场计算领域获得广泛应用,极大地促进了 MFL 检测技术的发展。大量研究工作采用有限元方法,分别建立了用于石油管道缺陷 MFL 检测的静态以及瞬态仿真模型,并通过对比两种模型的计算误差,推导了静态仿真模型的适用条件,并建立了缺陷 MFL 检测的三维积分方程,可对缺陷 MFL 检测信号进行有效的计算。Kovács G. 采用有限元方法获得了缺陷的仿真 MFL 检测信号,并与实测信号进行了对比分析。Altschuler E. 等人建立了管道缺陷 MFL 检测的非线性数值模型,研究了 MFL 检测信号受管壁厚度、缺陷尺寸以及外加磁场强度等影响的规律。Al-Naemi F. I. 等人整理了各种用于 MFL 检测系统建模的有限元方法,并对二维模型与三维模型的预测信号进行比较,证实了二维模型预测信号误差更大的原因是其缺陷区域更容易过饱和。这些数值计算方法,可实现任意形状缺陷 MFL 信号的准确计算,但普遍存在计算工作量大的缺点。为此,Zhang Z. 等人根据磁化水平,将 MFL 检测模型中的非线性铁磁材料划分为不同的区域,并将每个区域赋予合适的磁导率值,进而建立了用于 MFL 检测信号预测的等效线性模型。这种等效模型可提高 MFL 检测信号的计算效率,但同时也降低了数值计算方法原有的准确度。

数值计算方法的应用,也促进了关于 MFL 检测信号受磁化强度、缺陷尺寸和残余应力等影响的研究。Usarek Z. 等人通过有限元仿真,研究了缺陷几何尺寸变化以及残余应力引

发的弹性形变对 MFL 检测信号的影响。Leonard S. 等人发现,油气管道的管线压力、弯曲应力和残余应力的改变均会导致缺陷 MFL 检测信号的变化,并通过有限元计算,证实了应力会导致管壁材料出现各向异性的特性。Babbar V. 利用三维有限元仿真,研究了缺陷尺寸以及局部残余应力对钢板缺陷 MFL 检测信号的影响。Ivanov P. A. 等人提出了管道机械损伤缺陷 MFL 检测的两阶段有限元建模方法,首先从结构模型推导出管道的应力分布,进而建立应力水平到磁导率的映射关系,最终将管道的应力分布嵌入到有限元计算模型,得到了实验结果的验证。以上这些研究,揭示了磁化强度和残余应力等因素对 MFL 检测信号的影响规律,但是并未针对 MFL 检测缺陷量化反演提出相应的修正方法。

MFL 检测过程中由于速度效应导致的涡流,也通过数值计算方法得到了研究,建立了 MFL 检测的三维暂态有限元仿真模型,研究了高速 MFL 检测产生涡流的特征,分析了高速 MFL 检测过程中铁磁性材料磁化强度与磁导率的变化情况,研究了高速 MFL 检测产生涡流的特性,通过实验证实 MFL 检测的最大有效检测速度可达到 200km/h。Norouzi E. 等人通过有限元仿真,研究了不同长度磁轭下试件内部的磁力线分布,提出了通过合理设计磁轭以减小试件内部磁场不均匀性的方法,可减小检测器移动导致的涡流。Park G. S. 等人基于三维有限元仿真,对 MFL 检测中速度效应引起的涡流进行了研究,提出了涡流导致检测信号失真的补偿方法。从整体上看,现阶段的研究大多集中于涡流自身的原理与特性,并未进一步研究涡流对 MFL 检测信号以及缺陷量化反演结果所产生的影响。

2. MFL 信号处理技术

在理论研究水平不断提高的同时,MFL 检测信号的压缩、降噪和修正等处理技术也取得了快速发展。有人提出一种基于上下文的树形加权 MFL 检测数据无损压缩算法,相对于传统的 LZW 压缩算法具有更高的压缩效率。Afzai M. 等人提出了一种基于自适应滤波和小波技术的无缝钢管 MFL 检测信号降噪方法,具有较高的计算效率和数据独立性。Park G. S. 等人提出了一种永磁体尺寸优化设计方法,并研发了可检测小深度缺陷的新型传感器系统,提高了 MFL 检测的灵敏度。有研究者建立了具有非线性比例系数的三维磁传感器模型,有效抑制了磁传感器的非线性,进而提出了三维磁传感器的标定方法,研究了机械边界条件与材料参数对磁传感器灵敏度的影响。有人提出了用于磁传感器标定与优化的一种新方法,得到了一种基于分布式霍尔元件架构的 MFL 检测信号提离值补偿方法,通过将霍尔器件分割为分布于硅片表面的多个霍尔块,然后调整霍尔块数量以及其中的基准电流水平,可以满足测量提离值、提离值偏移以及信噪比等多方面的要求。以上这些信号处理技术,会对 MFL 检测信号的完整性和信噪比等产生较大的影响,若得到合理的运用,可以对 MFL 检测缺陷量化反演的结果起到改善作用。

3. 新型传感器与检测方法

新型以及高性能磁传感器的研发,促进了 MFL 检测技术的发展。Pelkner M. 等人使用高灵敏度的三轴 GMR 传感器进行 MFL 检测,对试件上缺陷的最小检测深度达到了 $44\mu\text{m}$ 。Tehranchi M. M. 等人将石榴石磁光薄膜作为传感器,用于金属表面缺陷 MFL 信号的检测,研究了传感器输出随缺陷尺寸的变化规律,实验结果表明,该传感器在微小缺陷的高精度磁成像应用中具有应用前景。同时,该组研究人员采用基于钴基非晶丝的双核 GMI

传感器检测金属表面缺陷的 MFL 信号,发现所用传感器的输出与缺陷尺寸之间具有良好的相关性。更有研究者建立了同时满足 MFL 检测与磁致伸缩导波检测要求的静态轴向磁化场,研发了可同时进行漏磁与磁致伸缩导波检测的复合式传感器,并将其成功应用于桥梁缆索的断线检测。Angani C. S. 等人利用线性集成霍尔与 GMR 传感器阵列测量漏磁场信号,实现了对冷轧钢卷内部杂质的检测。

同时,有研究人员提出一些新型的 MFL 检测方法,并进行了实验验证。Nara T. 等人提出了基于 MFL 信号离散傅里叶系数的铁磁性管道无损检测新方法,分别测量 MFL 信号的离散傅里叶正弦与余弦系数,进而求取两类系数的比值与平方根,以进行缺陷评估。Jun J. 等人应用线性集成霍尔传感器阵列,同时采用涡流与 MFL 检测方法,实现了对传统检测方法难以检测的奥氏体不锈钢的检测。Sun Y. 等人提出了一种可用于全向缺陷的 MFL 检测单向磁化方法,可有效检测与磁化方向平行的缺陷,与传统的多向复合磁化方法相比,该方法的磁化结构得到了明显简化;提出了基于正交磁化的钢管高速 MFL 检测方法,仅需沿轴向对钢管进行线扫描,无需进行复杂的螺旋扫描;提出了一种近零基准磁场的 MFL 检测新方法,可在较大的检测提离值下对缺陷漏磁场进行有效检测,从而减小探头磨损并降低检测信号的噪声与失真。Sophian A. 等人提出了利用方波激励磁化的脉冲漏磁检测方法,利用方波的多频率特性获取待检测材料内部不同深度的信息,对近表面微小缺陷具有较好的检测效果。

1.3.2 缺陷量化反演技术研究

在理论和相应技术快速发展的同时,MFL 检测的缺陷量化反演技术也获得了较快的发展。总体上,MFL 检测缺陷量化反演技术经历了由简单到复杂、由定性识别到定量分析的发展历程。关于 MFL 检测缺陷量化反演技术的研究大致可归纳为三个阶段。

1. 简单的定量判断

早期的 MFL 检测,通过对 MFL 检测信号进行简单的阈值处理,以定量地判断缺陷是否超限。有文献推导了静磁场 MFL 问题的通用磁势方程,建立了典型缺陷的三维有限元仿真模型,进而研究了缺陷参数与 MFL 检测信号之间的关系,分析了管道 MFL 检测周向信号的特征,建立了其与缺陷尺寸参数间的映射关系,可进行缺陷几何参数的定量识别。Saranya R. 等人比较研究了用于 MFL 检测缺陷识别的区域生长算法、最小误差阈值算法和形态学分割算法,发现区域生长算法对不同缺陷 MFL 检测信号的适用性最强。

这些早期的定量判断方法,虽然可以判断出缺陷的相对大小,但是识别精度低,且对人工经验的依赖性大。

2. 当量尺寸量化

20 世纪 90 年代起,研究人员开始研究缺陷等量长度、宽度与深度尺寸的量化方法。在这一阶段内,统计识别与人工神经网络等技术在 MFL 检测缺陷量化反演领域获得了广泛应用。

蒋奇基于有限元法研究了管道 MFL 检测中缺陷尺寸、管道材质、检测速度、残余应力