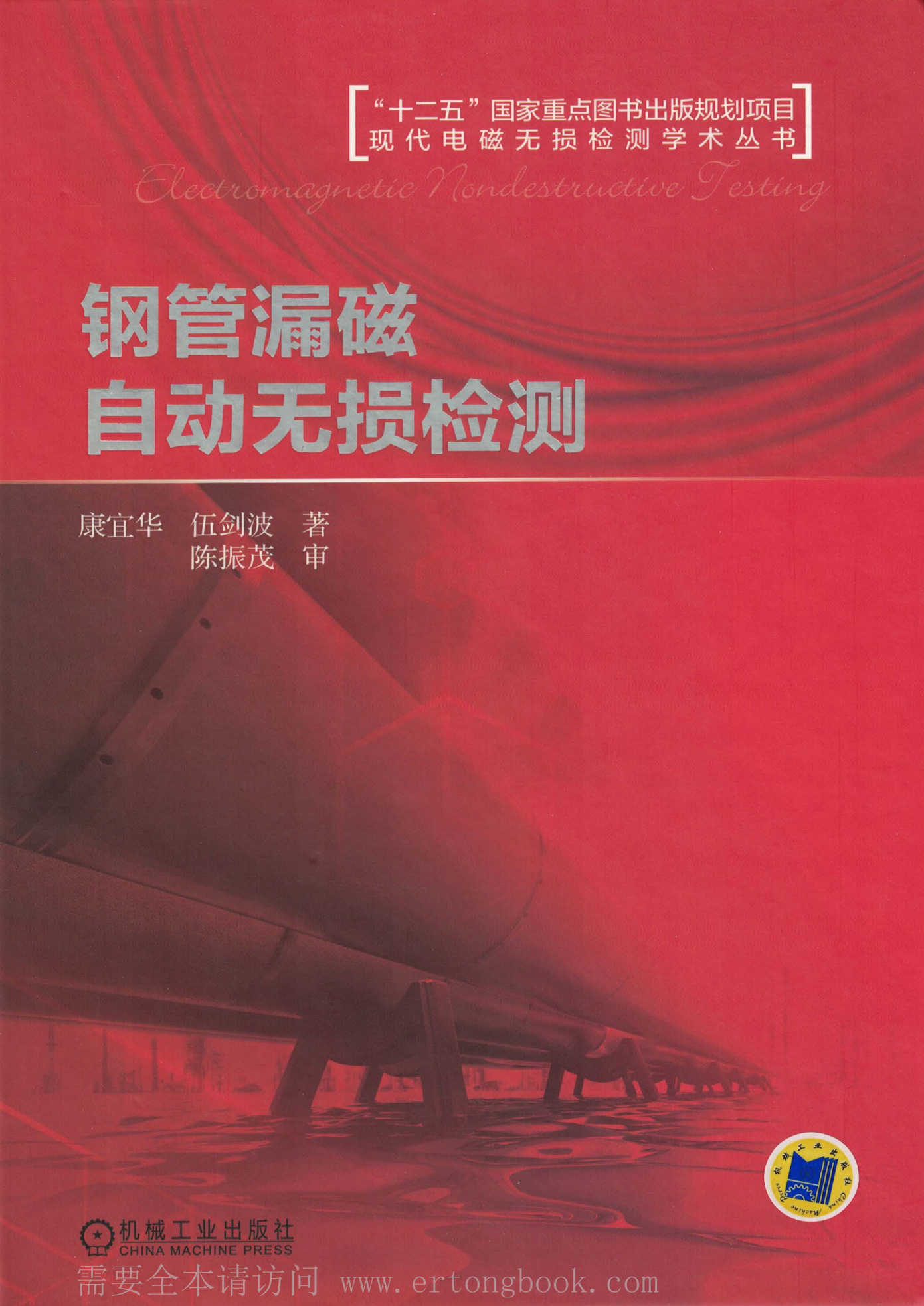
“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代电磁无损检测学术丛书

Electromagnetic Nondestructive Testing

钢管漏磁自动无损检测

康宜华　伍剑波　著
陈振茂　审



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代电磁无损检测学术丛书

钢管漏磁自动无损检测

康宜华　伍剑波　著
陈振茂　审

机 械 工 业 出 版 社

本书是现代电磁无损检测学术丛书之一。本书主要阐述漏磁检测技术在钢管自动化无损检测中的理论、方法与应用问题，主要内容包括：钢管中缺陷类型及形成原因、钢管常用无损检测方法及对比、钢管复合磁化原理与方法、钢管漏磁场拾取与信号处理方法、钢管漏磁检测的精度影响因素与高精度检测方法、高速漏磁检测中的涡流效应与磁后效形成机理、钢管自动化漏磁检测系统的组成及应用，最后介绍了漏磁检测技术的其他应用，包括在回收钻杆、井口钻杆、修复抽油杆、冷拔钢棒、汽车轮毂轴承旋压面以及轴承套圈上的实现方法与现场应用。

本书内容适合于钢管和油井管的生产与使用部门的技术和管理人员参考，可作为高等院校相关专业的参考教材，也可供从事无损检测技术的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

钢管漏磁自动无损检测/康宜华，伍剑波著. —北京：机械工业出版社，2017.3

（现代电磁无损检测学术丛书）

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-111-55859-0

Ⅰ.①钢… Ⅱ.①康… ②伍… Ⅲ.①钢管－漏磁－无损检验 Ⅳ.①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 325433 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：薛 礼 责任编辑：李超群 郑 丹 安桂芳

责任校对：刘雅娜 樊钟英 封面设计：鞠 杨

责任印制：李 飞

北京铭成印刷有限公司印刷

2017 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14.25 印张 · 2 插页 · 343 千字

0 001— 1500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-55859-0

定价：138.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务 网络服务

服务咨询热线：010－88361066 机 工 官 网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010－68326294 机 工 官 博：weibo.com/cmp1952

010－88379203 金 书 网：www.golden－book.com

封面无防伪标均为盗版 教育服务网：www.cmpedu.com

现代电磁无损检测学术丛书编委会

学术顾问：程开甲（院士，国家最高科学技术奖获得者，“两弹一星”功勋奖章获得者）

主　　任：杨叔子（院士）

副 主 任：徐滨士（院士）陈达（院士）

委　　员（按姓氏笔画排序）：

叶　琛　田贵云　伍剑波　任吉林　严仍春　李光浩　李路明

杨叔子（院士）　杨理践　沈建中　宋　凯　张履谦（院士）

陈　达（院士）　陈振茂　范　弘　林俊明　胡先龙　钱七虎（院士）

徐可北　徐滨士（院士）　黄松岭　康宜华　董世运　程开甲（院士）

曾志伟　雷　洪　雷银照　蔡桂喜

序 1

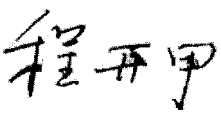
利用大自然的赋予，人类从未停止发明创造的脚步。尤其是近代，科技发展突飞猛进，仅电磁领域，就涌现出法拉第、麦克斯韦等一批伟大的科学家，他们为人类社会的文明与进步立下了不可磨灭的功绩。

电磁波是宇宙物质的一种存在形式，是组成世间万物的能量之一。人类应用电磁原理，已经实现了许多梦想。电磁无损检测作为电磁原理的重要应用之一，在工业、航空航天、核能、医疗、食品安全等领域得到了广泛应用，在人类实现探月、火星探测、无痛诊疗等梦想的过程中发挥了重要作用。它还可以帮助人类实现更多的梦想。

我很高兴地看到，我国的无损检测领域有一个勇于探索研究的群体。他们在前人科技成果的基础上，对行业的发展进行了有益的思考和大胆预测，开展了深入的理论和应用研究，形成了这套“现代电磁无损检测学术丛书”。无论他们的这些思想能否成为原创技术的基础，他们的科学精神难能可贵，值得鼓励。我相信，只要有更多为科学无私奉献的科研人员不懈创新、拼搏，我们的国家就有希望在不久的将来屹立于世界科技文明之巅。

科学发现永无止境，无损检测技术发展前景光明！

中国科学院院士



2015 年秋日

需要全本请访问 www.ertongbook.com

序 2

无损检测是一门在不破坏材料或构件的前提下对被检对象内部或表面损伤以及材料性质进行探测的学科，随着现代科学技术的进步，综合应用多学科及技术领域发展成果的现代无损检测发挥着越来越重要的作用，已成为衡量一个国家科技发展水平的重要标志之一。

现代电磁无损检测是近十几年来发展最快、应用最广、研究最热门的无损检测方法之一。物理学中有关电场、磁场的基本特性一旦运用到电磁无损检测实践中，由于作用边界的复杂性，从“无序”的电磁场信息中提取“有用”的检测信号，便可成为电磁无损检测技术理论和应用工作的目标。为此，本套现代电磁无损检测学术丛书的字里行间无不浸透着作者们努力的汗水，闪烁着作者们智慧的光芒，汇聚着学术性、技术性和实用性。

丛书缘起。2013 年 9 月 20—23 日，全国无损检测学会第 10 届学术年会在南昌召开。期间，在电磁检测专业委员会的工作会议上，与会专家学者通过热烈讨论，一致认为：当下科技进步日趋强劲，编织了新的知识经纬，改变了人们的时空观念，特别是互联网构建、大数据登场，既给现代科技，亦给电磁检测技术注入了全新的活力。是时，华中科技大学康宜华教授率先提出：敞开思路、总结过往、预测未来，编写一套反映现代电磁无损检测技术进步的丛书是电磁检测工作者义不容辞的崇高使命。此建议一经提出，立即得到与会专家的热烈响应和大力支持。

随后，由福建省爱德森院士专家工作站出面，邀请了两弹一星功勋科学家程开甲院士担任丛书总顾问，钱七虎院士、徐滨士院士、陈达院士、杨叔子院士、张履谦院士等为顾问委员会成员，为丛书定位、把脉，力争将国际上电磁无损检测技术、理论的研究现状和前沿写入丛书中。2013 年 12 月 7 日，丛书编委会第一次工作会议在北京未来科技城国电研究院举行，制订出 18 本丛书的撰写名录，构建了相应的写作班子。随后开展了系列活动：2014 年 8 月 8 日，编委会第二次工作会议在华中科技大学召开；2015 年 8 月 8 日，编委会第三次工作会议在国电研究院召开；2015 年 12 月 19 日，编委会第四次工作会议在西安交通大学召开；2016 年 5 月 15 日，编委会第五次工作会议在成都电子科技大学召开；2016 年 6 月 4 日，编委会第六次工作会议在爱德森驻京办召开。

好事多磨，本丛书的出版计划一推再推。主要因为丛书作者繁忙，常“心有意而力不逮”；再者丛书提出了“会当凌绝顶，一览众山小”高度，故其更难矣。然诸君一诺千金，知难而进，经编委会数度研究、讨论精简，如今终于成集，圆了我国电磁无损检测学术界的一个梦！

最终决定出版的丛书，在知识板块上，力求横不缺项，纵不断残，理论立新，实证鲜活，预测严谨。丛书共包括九个分册，分别是：《钢丝绳电磁无损检测》《电磁无损检测数值模拟方法》《钢管漏磁自动无损检测》《电磁无损检测传感与成像》《现代漏磁无损检测》《电磁无损检测集成技术及云检测/监测》《长输油气管道漏磁内检测技术》《金属磁记忆无损检测理论与技术》《电磁无损检测的工业应用》，代表了我国在电磁无损检测领域的最新研究和应用水平。

丛书在手，即如丰畴拾穗，金瓯一拢，灿灿然皆因心仪。从丛书作者的身上可以感受到电磁检测界人才辈出、薪火相传、生生不息的独特风景。

概言之，本丛书每位辛勤耕耘、不倦探索的执笔者，都是电磁检测新天地的开拓者、观念创新的实践者，余由衷地向他们致敬！

经编委会讨论，推举笔者为本丛书总召集人。余自知才学浅薄，诚惶诚恐，心之所系，实属难能。老子曰：“夫代大匠斫者，希有不伤其手者矣”。好在前有程开甲院士屈为总顾问领航，后有业界专家学者扶掖护驾，多了几分底气，也就无从推诿，勉强受命。值此成书在即，始觉“千淘万漉虽辛苦，吹尽狂沙始到金”，限于篇幅，经芟选，终稿。

洋洋数百万字，仅是学海撷英。由于本丛书学术性强、信息量大、知识面宽，而笔者的水平局限，疵漏之处在所难免，望读者见谅，不吝赐教。

丛书的编写得到了中国无损检测学会、机械工业出版社的大力支持和帮助，在此一并致谢！

丛书付梓费经年，几度惶然夜不眠。

笔润三秋修正果，欣欣青绿满良田。

是为序。

现代电磁无损检测学术丛书编委会总召集人

中国无损检测学会副理事长



丙申秋

前　言

无损检测技术在材料加工、产品制造及使用过程中发挥着保证质量、保障安全、节约能源的重要作用。

漏磁无损检测技术在钢铁和石油等行业的安全高效生产中应用广泛。钢管在出厂之前必须进行100%的质量检测。目前，我国已具有世界上最先进的钢管生产工艺和最新的轧管机组，钢管最大生产速度高达960支/h，为匹配钢管的生产节奏，钢管检测设备的速度越来越快，提升钢管漏磁检测的速度与精度迫在眉睫。

本书是作者对近20年来从事钢管漏磁无损检测理论、方法与应用研究的总结。立足于理论创新和应用实践，经过作者团队的不懈努力，钢管漏磁检测方法与技术获得了突破，也发现了一些问题，并逐步得到解决，开发的钢管漏磁自动化检测设备在钢管生产和油井管检测中获得了广泛应用。本书共分为7章，系统介绍了钢管漏磁自动化无损检测的原理、方法与应用技术，包括钢管中的缺陷及成因、钢管的磁化与退磁理论、管外漏磁场的拾取原理与传感器设计、影响检测精度的因素与精度提高方法、高速漏磁检测中的新电磁现象、钢管自动化检测系统与装备，以及漏磁检测技术在其他铁磁构件质量检测中的应用。本书由康宜华统稿，第1章、第7章主要由康宜华完成，第2章至第6章主要由伍剑波完成。陈振茂负责全书的审稿工作，并提出了宝贵的修改意见。

我国的漏磁检测技术研究与应用起步较晚，一些关键技术一直被国外企业垄断，导致国内企业花费大量外汇购买钢管漏磁检测设备。随着我国钢管生产率和质量要求的不断提高，钢管漏磁检测设备需求旺盛，从而带动了相关理论和技术的研究。希望本书能够为广大理论研究、设备开发和使用人员提供参考。书中错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

作　者

目　　录

序 1
序 2
前言
第 1 章　绪论 …… 1
1.1　钢管中的缺陷 …… 1
1.1.1　固有的缺陷 …… 1
1.1.2　预制工序的缺陷 …… 2
1.1.3　后续工序的缺陷 …… 3
1.1.4　在役的缺陷 …… 4
1.2　钢管无损检测方法 …… 5
1.2.1　钢管超声检测 …… 6
1.2.2　钢管涡流检测 …… 6
1.2.3　钢管磁粉检测 …… 8
1.2.4　钢管漏磁检测技术研究概况 …… 8
1.3　钢管的组合检测及典型缺陷信号 …… 10
1.4　钢管生产工艺对漏磁检测的影响 …… 14
1.5　表面粗糙度对裂纹漏磁检测的影响 …… 15
1.5.1　表面粗糙度试块 …… 15
1.5.2　表面粗糙度对漏磁检测信号的影响试验 …… 16
1.5.3　粗糙表面的磁场分布 …… 19
1.6　钢管漏磁检测过程中的相关术语 …… 20
1.6.1　与钢管漏磁检测方法相关的术语 …… 21
1.6.2　与钢管磁化相关的术语 …… 21
1.6.3　与磁场测量相关的术语 …… 22
1.6.4　与钢管漏磁检测系统相关的术语 …… 24
1.7　本书主要内容与框架 …… 25
第 2 章　钢管的磁化与退磁 …… 26
2.1　磁性材料的分类 …… 26
2.2　钢管的磁化要求 …… 27
2.3　钢管的多方向磁化方法 …… 28
2.3.1　轴向磁化方法与轴向磁化器 …… 29
2.3.2　周向磁化方法与周向磁化器 …… 34
2.4　钢管退磁方法 …… 37
2.4.1　钢管剩磁形成原因 …… 38
2.4.2　钢管剩磁方向 …… 39
2.4.3　退磁方法 …… 39
2.4.4　钢管退磁工艺 …… 40

第 3 章　管外漏磁场拾取与处理方法 …… 43
3.1　漏磁场拾取原理与传感器 …… 43
3.1.1　漏磁场及其拾取原理 …… 43
3.1.2　磁场传感器 …… 44
3.2　漏磁检测探头 …… 49
3.2.1　漏磁检测探头的结构形式 …… 49
3.2.2　漏磁检测探头的检测特性 …… 49
3.3　漏磁检测探头部件 …… 53
3.3.1　探头扫查路径规划 …… 54
3.3.2　线阵漏磁检测直探头 …… 55
3.3.3　高速气浮扫查方法与机构 …… 57
3.3.4　阵列漏磁检测信号系统 …… 58
第 4 章　漏磁检测精度的影响因素 …… 64
4.1　缺陷内外位置 …… 64
4.1.1　内、外部缺陷的漏磁场差异 …… 64
4.1.2　基于检测信号中心频率的区分方法 …… 69
4.1.3　基于检测信号中心斜率的区分方法 …… 71
4.1.4　基于数字信号差分的区分方法 …… 79
4.1.5　基于双层梯度检测的区分方法 …… 84
4.2　钢管壁厚不均 …… 89
4.2.1　壁厚不均的磁场分布 …… 90
4.2.2　壁厚不均对缺陷漏磁场的影响 …… 93
4.2.3　消除壁厚不均影响的方法 …… 95
4.3　缺陷走向 …… 99
4.3.1　缺陷走向对漏磁场分布的影响 …… 100
4.3.2　消除缺陷走向影响的方法 …… 104
4.4　传感器阵列差异 …… 112
4.4.1　静态标定方法 …… 113
4.4.2　动态标定方法 …… 115
第 5 章　高速检测中的涡流效应与磁后效 …… 116
5.1　高速漏磁检测的涡流效应 …… 116
5.1.1　高速运动中的电磁感应 …… 116
5.1.2　感生磁场对缺陷漏磁场的影响 …… 121
5.1.3　消除感生磁场影响的方法 …… 125
5.2　高速漏磁检测的磁后效现象 …… 134
第 6 章　钢管漏磁自动化检测系统 …… 136
6.1　钢管漏磁自动化检测工艺与设备配置 …… 136
6.1.1　检测工艺描述 …… 136
6.1.2　设备主要技术参数 …… 136
6.1.3　设备主要组成 …… 140
6.2　探头检测轨迹规划 …… 143
6.2.1　钢管自动检测的运动方式 …… 145

6.2.2 自动漏磁检测的扫查轨迹 …… 147
6.2.3 钢管全覆盖无盲区检测 …… 152
6.3 高稳定性的检测姿态与跟踪机构 …… 154
6.3.1 钢管运动自由度 …… 154
6.3.2 探头跟踪机构的运动学 …… 155
6.3.3 探头最优检测姿态的实现 …… 157
6.4 缺陷的定位与喷标 …… 158
6.4.1 标记系统 …… 158
6.4.2 喷枪结构 …… 159
6.4.3 喷标控制 …… 159
6.5 漏磁自动检测设备的性能测试 …… 163
6.5.1 样管 …… 164
6.5.2 测试方法 …… 165
第 7 章 漏磁检测技术的其他应用 …… 166
7.1 回收钻杆自动化检测与分级系统 …… 166
7.1.1 检测分级工艺 …… 167
7.1.2 控制系统 …… 168
7.1.3 现场应用 …… 168
7.2 井口钻杆漏磁检测仪器 …… 169
7.2.1 整体方案 …… 169
7.2.2 励磁线圈 …… 170
7.2.3 现场应用 …… 170
7.3 修复抽油杆漏磁检测方法与系统 …… 172
7.3.1 检测原理 …… 173
7.3.2 整体方案 …… 175
7.3.3 现场应用 …… 177
7.4 冷拔钢棒交流漏磁检测方法与装置 …… 177
7.4.1 检测原理 …… 178
7.4.2 整体方案 …… 178
7.4.3 检测探头 …… 179
7.4.4 现场应用 …… 180
7.5 汽车轮毂轴承旋压面漏磁检测方法与装置 …… 181
7.5.1 磁化装置 …… 182
7.5.2 检测探头 …… 185
7.5.3 检测平台 …… 187
7.5.4 现场应用 …… 192
7.6 轴承套圈裂纹漏磁检测方法与装置 …… 192
7.6.1 检测原理 …… 193
7.6.2 检测探头 …… 197
7.6.3 检测装备 …… 201
7.6.4 现场应用 …… 206
参考文献 …… 207

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第 1 章　绪　　论

无损检测技术在材料加工、产品制造及使用过程中发挥着重要作用，一方面保证了产品质量，另一方面确保使用中器件的安全。其中，漏磁无损检测技术广泛应用于铁磁性构件的无损检测，尤其在钢铁和石油等行业的安全高效生产中效果显著。

我国的有缝和无缝钢管的产量已成为全球第一，随着质量要求的提升，钢管在出厂之前必须进行 100% 的无损检测。目前，我国已具有世界上最先进的钢管生产工艺和最新的轧管机组，热轧钢管的最大生产速度已达到 8m/s、生产速度高达 960 支/h。为匹配钢管的生产速度，要求钢管检测设备的速度越来越快，因此提升钢管漏磁检测的速度与精度迫在眉睫。

本书着重于制管过程中的漏磁无损检测技术，论述高速、高精度漏磁无损检测过程中出现的新问题、新方法和新工艺。漏磁检测的原理和方法已有了相关的研究论述，作为全书的铺垫，本章重点论述钢管漏磁检测的基本概念、关键方法和现有技术状态。

1.1　钢管中的缺陷

钢管漏磁检测的最终目的是发现钢管中的缺陷。然而，在进行检测之前，首先需要对钢管中可能存在的缺陷及其形成原因加以预测和分析，之后才能更好地实施漏磁检测方法并准确分析检测结果，为后续的生产和使用提供参考依据。

缺陷可以定义为材料的几何形状和组织成分的变化，这种变化可能会影响钢管的力学性能和使用要求，严重时导致钢管构件发生失效。钢管中的缺陷可根据钢管生产和使用的不同阶段分为以下四类：固有的缺陷、预制工序的缺陷、后续工序的缺陷和在役的缺陷。下面对四个过程中产生缺陷的原因进行讨论。

1.1.1　固有的缺陷

钢管是由熔化金属凝固而成的钢坯制成的，在此过程中会产生固有缺陷，这些缺陷的大部分在切除头尾时会被去除，但仍有一定数量的缺陷残留在钢坯之中，随钢坯一起进入下道工序中。

表 1-1 介绍了钢管中常见固有缺陷的位置及成因。

表 1-1　钢管中常见固有缺陷的位置及成因

缺陷	位置	形成原因
缩孔	近表面	最后凝固时熔化金属收缩孔
铸造热裂纹	内外表面	由于凝固速度不同而产生应力
气孔	表面或近表面	金属凝固时气体被残留
夹杂物	表面或近表面	铸造过程中渗入了杂质

1. 缩孔

液态金属从浇注温度凝固冷却到室温的过程中，体积会收缩。由于金属的液态收缩和凝

固收缩之和远远小于固态收缩，在铸件最后凝固的区域会出现空洞集中。此时，如熔化金属不足以补充填满锭坯头部，结果便形成空腔，通常此空腔形状呈倒锥或圆柱形。假如收缩空腔在钢坯出厂前未能全部切除，则其将在成品钢管中被延伸成空隙，此空隙称为缩孔。

2. 铸造热裂纹

铸件在凝固后期，固相已基本形成骨架，并开始线收缩。如果在此过程中受到几何制约，使线收缩受阻，铸件内将产生热裂纹，并通常出现在铸件最后凝固的地方。根据热裂纹形成的位置，热裂纹可分为外热裂纹和内热裂纹。

外热裂纹特征：裂口从铸件表面开始，逐渐延伸到内部，呈表面宽内部窄，裂纹被氧化而变色。铸件表面有单条或多条裂纹，裂纹长度短、不规则、有分叉。

内热裂纹特征：内热裂纹主要产生于厚实铸件最后凝固的中心部位，或由于补缩不良，产生于缩孔尾部延伸入铸件中。内热裂纹走向无规律性，钢坯内热裂纹的周围可能硫磷偏析严重。

3. 气孔

气孔，也称气眼，是钢坯生产中的主要缺陷之一，产生于铸件内部、表面或近表面，呈大小不等的圆形、长形及不规则形，有单个的，也有聚集成片的，孔壁光滑，颜色为白色。根据形状及形成原因一般分为气孔、气泡、针孔、气疏松和气缩孔。

4. 夹杂物

在炼钢过程中，少量炉渣、耐火材料及冶炼反应产物可能进入钢液，形成非金属夹杂物。不同形态的夹杂物混杂在金属内部，破坏了金属的连续性和完整性。夹杂物会降低钢管的力学性能、特别是塑性、韧性和疲劳极限。其他促使产生非金属夹杂物的原因是：不良的浇注方法和不适当的浇注体系会使金属液在锭模中产生湍流。

非金属夹杂物的形状以及它与周围材料不连续和不相容的特点，使它所处部位的应力升高。这些夹杂物的存在，使钢管承受高冲击、静态或疲劳应力的性能降低。夹杂物对上述性能的影响，取决于自身的尺寸、形状、抗变形性，与施加有关应力的方向和材料的抗拉强度有关。许多夹杂物也可使其所在金相组织，比之基体材料和其他部段更加复杂。每种金属都具有自己特有的夹杂物。

典型情况下，钢管中的夹杂物因塑性变形而变成拉长的形状，即在纵剖面上呈带状或条状，而在横截面上则呈较圆的或扁平的形状。

1.1.2 预制工序的缺陷

预制工序的缺陷定义为：钢坯中固有的缺陷经加热或冷却仍存在者；钢管在轧制过程中新产生的特有缺陷。

表 1-2 介绍了预制工序中形成的缺陷的位置及成因。

表 1-2 预制工序中形成的缺陷的位置及成因

缺陷	位置	形成原因
裂纹	表面	表面凹陷不连续，在轧制中被拉长
分层	表面或近表面	固有缺陷在轧制时被拉长和压扁
发纹	近表面	固有缺陷在轧制时被拉长和压扁
杯形裂纹	近表面	冷拔时内应力
冷却裂纹	表面	冷拔制成品冷却不当
折叠	表面	多余材料覆盖和压入表面

1. 裂纹

钢坯加工时，如气孔、裂纹之类固有的表面缺陷，经轧制和拉拔后呈纵向分布，此时，轧制作业的材料表面便产生凹陷。由于这一缺陷的圆滑过渡不佳或尺寸过大，因此可能以此为源头，在成品和半成品钢管上产生裂纹。

2. 分层

分层是典型的、平行于钢管表面的分离，它是气孔、裂开的缩孔、非金属夹杂物或裂纹等内部不连续在轧制过程中被延伸和压扁而成。分层可以在表面或近表面，一般是扁平的，而且非常薄。

3. 发纹

发纹主要出现在钢管近表面，是由于轧制时将非金属夹杂物压扁和拉长而形成的。典型的发纹呈断续的直线状，与钢管的轴线方向平行。

4. 杯形裂纹

杯形裂纹大都发生在挤压或冷拔作业期间，是由于金属内部不能像表面一样快速形变，以致产生内应力，从而导致形成横向杯形裂纹。

5. 冷却裂纹

毛管轧制完成之后，若冷却不均匀，便因内应力而造成冷却裂纹。典型的冷却裂纹呈纵向，往往很深且很长，虽然很易与裂纹混同，但冷却裂纹表面不显示氧化现象。

6. 折叠

钢管轧制折叠是金属被重叠，即金属间被紧紧挤压在一起但仍未熔合的区域。毛管通过轧机时，挤出过多的材料，如果紧接着进行滚压，则凸瘤或翅形部位将被挤压到坯料表面上，由于表面严重氧化，故不能与轧制表面弥合，从而形成折叠。轧制折叠往往呈线性状或稍有曲折，纵向，平行于制件表面或与表面有小的夹角。

1.1.3　后续工序的缺陷

在热处理、机械加工、镀层和精加工作业中的不连续，都属于后续工序的不连续。这类不连续的代价极为昂贵，使前道工序完全作废。

后续工序中形成的缺陷位置及成因见表 1-3。

表 1-3　后续工序中形成的缺陷位置及成因

缺陷	位置	形成原因
热处理裂纹	表面	加热或者冷却不均匀产生的应力超过材料的抗拉强度
淬火裂纹	表面	高温时急冷形成
机加工撕裂	表面	不恰当的机加工实施方法
镀层裂纹	表面	残余应力释放

1. 热处理裂纹和淬火裂纹

为了使钢管获得规定的硬度和金相组织，需要对钢管进行热处理。在实施这种作业时，金属在受控条件下加热和冷却。然而，在某些情况下，当这种处理产生的应力超过材料的抗拉强度时，便形成裂纹。与此相似，若部件被加热到很高温度，然后（在空气、油或水中）急冷，则可能产生淬火裂纹。

淬火裂纹作为应力集中之处，能成为疲劳裂纹的来源和扩展点，而且也可能成为过载失效的起始点。某些淬火作业严重失误时，可使部件在处理时就爆裂。

热处理裂纹和淬火裂纹，通常易产生于截面薄的部位或材料厚度变化之处，如转角、台阶、槽，这是由于这些区域冷却较快因而首先相变。热处理或淬火作业时，材料的运动被约束，也会影响裂纹位置。热处理裂纹或淬火裂纹是典型的呈分叉状的表面指示，在试件上随机地呈任何方向。

2. 机加工撕裂

钝的机加工刀具切削钢管时，或多或少地会使钢管表面产生粗糙不平的划痕，这是由于钢管加工表面被硬化所致，而硬化度取决于切削量的大小、刀具和钢管的材料。

粗加工时过深的切削纹路和残留刀痕，具有增大应力的作用，会促使部件过早失效。机加工撕裂虽然检测较难，但必须精确、细致地加以检出和判别。

3. 镀层裂纹

镀层在钢管生产中具有广泛的用途，如装饰、防腐蚀、抗磨损和修整尺寸不足等。但是，特殊的镀层材料会产生抗拉或压缩的残余应力，如铬层、铜层和镍层产生的抗拉应力，会降低部件的疲劳强度。当镀层中渗入氢或者氢从热镀层材料渗入基体金属时，便产生镀层裂纹。

产生或引发镀层裂纹的机理是：材料硬度和残余应力高，而在施镀或酸洗作业时吸收了氢气，则更助长了裂纹的形成。

1.1.4 在役的缺陷

部件的使用寿命与工作环境（机械和化学的）、维修质量和设计有关。由于钢管构件工作环境复杂，产生缺陷的原因也不尽相同。当钢管部件使用一段时间之后，需要对其进行质量检测与评价，以预测其使用寿命，之后根据钢管检测质量可采取降级使用、维修或报废处理等措施。

铁磁性材料常见的在役过程中形成的缺陷位置及成因见表 1-4。

表 1-4 在役过程中形成的缺陷位置及成因

缺陷	位置	形成原因
疲劳裂纹	表面	施加周期性应力低于材料的极限抗拉强度
应力腐蚀裂纹	表面	拉伸静载荷和腐蚀介质共同作用
氢裂纹	表面或近表面	拉伸或残余应力与富氢介质共同作用
腐蚀坑	表面	腐蚀介质和交变应力的共同作用

1. 疲劳裂纹

疲劳裂纹是由周期性加载应力形成的，这种应力值虽然低于材料的极限抗拉强度，但还是足以产生裂纹或使原有的裂纹扩展。

疲劳裂纹可以从诸如机加工痕迹或刀痕处、材料表面或附近的非金属夹杂物、空隙、孔、槽等高应力区形成，甚至也会在光滑的表面上产生。

随着承受的应力强度增加，疲劳裂纹首先在裂纹尖端开始扩展，然后随每个周期应力而逐渐增大，其增量正比于应力强度，这种过程一直持续到此应力强度到达临界值而发生断裂

为止。应力强度临界值也称断裂韧度，每种材料的断裂韧度不相同。

2. 应力腐蚀裂纹

应力腐蚀裂纹是一种机械断裂，是拉伸静载荷与环境腐蚀共同影响的结果。这里所述的应力，既包括实际施加的，也包括残余应力。之所以产生残余应力，其中最普遍的一个原因就是焊缝金属冷却时收缩所致。

环境腐蚀对不同材料的作用有所不同，就某些普通材料而言，能被环境腐蚀的有：暴露在咸水中的铝和奥氏体不锈钢，暴露在氨中的铜及其合金，以及暴露在氢氧化钠中的软钢。

应力腐蚀产生的脆性断裂，可以是晶间的，也可以是穿晶的，这取决于合金的种类和腐蚀环境。在大多数情况下，微细的裂纹往往透入部件的横截面，而在表面上只是显示一点腐蚀痕迹。

为了保持最小的应力强度，必须注意防止应力集中，如刀痕、电弧坑和接近表面的大型非金属夹杂物。

3. 氢裂纹

氢裂纹或氢脆是一种机械断裂，是由于部件在氢介质的腐蚀环境中使用并同时加载应力或残余应力而形成的。氢介质可通过诸如电镀、酸洗、潮湿空气中施焊或它自身溶解渗入材料等过程产生，也可能来自腐蚀，如硫化氢、氢气、水、沼气或氨等。

如果材料表面没有裂纹或不存在高应力处，则氢可以扩散进入金属，导致金属材料常在近表面处开裂，因为此处形成三维应力的空间最大。在低强度合金中，由此导致开裂的空间，称为氢气泡。

假如裂纹早已存在，则可以很容易地看到氢引起的裂纹有一个共同的特点，即在原裂纹尖端开裂扩展。

在许多实例中，氢早在部件投入使用之前就已存在于金属内部，因为材料开始凝固和施焊期间，氢很容易被熔化金属吸收渗入；在高温和在某些情况下，氢的溶解度非常之高，以致冷却时金属具有的氢已呈饱和状态。

氢裂纹沿晶界分布，很少呈分叉状。当这种裂纹由于气泡或静态载荷形成时，它总是位于部件表面之下。氢裂纹还可以出现在部件皮下或应力高的部位。

4. 腐蚀坑

应用于石油行业的钢管构件，如钻杆、套管、输油管道等，当输送石油、钻井液等流动腐蚀介质时，钢管会受到腐蚀和冲刷作用，并且部分构件所受应力复杂，容易产生腐蚀坑，使钢管管壁减薄。在某些恶劣的工作环境下，腐蚀坑进一步扩展，可能产生刺穿，从而使构件失效。

1.2　钢管无损检测方法

钢管自动无损检测方法主要包括超声、涡流、磁粉和漏磁检测等。

超声检测是一种基于声学的无损检测方法，其对表面和内部缺陷都具有较高的检测灵敏度。在实施过程中，超声检测要求钢管具有良好的表面洁净度，并且探头与被检试件之间需加耦合剂。由于超声波重复频率的限制，超声检测技术难以实现超高速检测。

涡流、磁粉与漏磁检测均属于电磁检测方法，在钢管质量无损检测中应用都较为广泛。

涡流检测是建立在电磁感应原理基础之上的一种无损检测方法，它以交变磁场作为激励，在钢管中产生感应电流，即涡流。由于钢管中的缺陷会导致感应电流的变化，利用这种现象可判知钢管缺陷的存在。涡流检测仅适用于导电材料，因趋肤效应其仅能检测表面及近表面缺陷。由于检测灵敏度的限制，涡流检测一般适用于小管径钢管的无损检测。

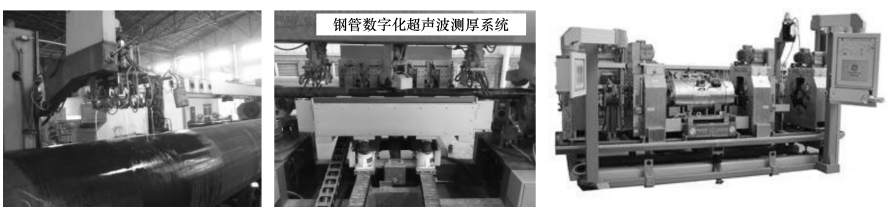
磁粉检测的原理是：对被检工件施加磁场使其磁化，则在工件的表面和近表面裂纹处将有磁力线逸出工件表面而形成漏磁场，有磁极的存在就能吸附施加在工件表面上的磁粉形成聚集磁痕，从而显示出裂纹的存在。磁粉检测基于人工观察、判断，工艺复杂，效率较低，因此一般仅用于钢管端部的无损检测。

漏磁检测与磁粉检测原理相同，差别在于：漏磁检测以磁场传感器代替磁粉，将缺陷漏磁场转换为电信号，之后进入计算机进行数字化处理，最终实现钢管自动化快速无损检测。漏磁检测由于采用恒定磁场磁化，穿透力强，可有效检测钢管内外部缺陷，且对试件表面质量状况要求低，无需耦合剂。

1.2.1 钢管超声检测

超声检测的基本原理是：将具有较强穿透能力的超声波导入钢管中，在遇到前后声阻抗不一致的交界面时，一部分声波会被反射回来，产生回波，系统可检测到这些回波，并进行放大处理，转换成数字信号，呈现在屏幕上。反射回来的能量大小与交界面两边介质声阻抗的差异和交界面的取向、大小有关。超声检测方法精度较高，可以检测表面及内部缺陷，实现缺陷的精确定位。不过，检测过程需要耦合剂，检测速度较慢。

根据钢管与检测探头的相对运动方式，钢管超声自动化检测系统可分为三类：钢管原地旋转，探头直线前进，如图 1-1a 所示；钢管螺旋推进，探头静止固定，如图 1-1b 所示；钢管直线推进，检测探头旋转，如图 1-1c 所示。三种检测系统主要根据检测效率、探头数量以及检测系统工艺布局来选择。第一种占地面积小，检测通道数少，效率较低，一般应用于钢管的离线检测。第二种与第三种检测效率较高，通道数较多，均需要较为复杂的输送辊道来驱动钢管运动，两种方式都广泛应用于钢管的在线检测。



a) b) c)

图 1-1 超声自动化检测系统

a）钢管原地旋转，探头直线前进 b）钢管螺旋推进，探头静止固定

c）钢管直线推进，检测探头旋转

1.2.2 钢管涡流检测

钢管涡流检测是以交流电磁线圈在金属构件表面感应产生涡流的无损检测技术，它适用于导电材料，可以检测铁磁性和非铁磁性金属构件中的缺陷。由于涡流检测在检测时不要求

需要全本请访问 www.ertongbook.com