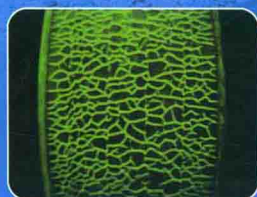
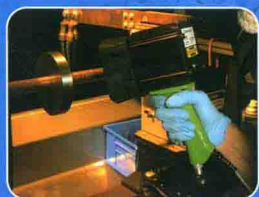




轨道交通装备无损检测人员资格培训及认证系列教材

磁粉 检测技术及应用

万升云 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



无损检测人员资格培训及认证系列教材

磁粉检测技术及应用

万升云 章文显 贾 敏 郑小康 李来顺 孙元德
段怡雄 高金生 周庆祥 宋以冬 石胜平 丁守立
姜 岩 尹 利 程志义 徐 伟 鲁传高 祁三军
桑劲鹏 李广立 葛佳棋 林正帅 钱政平

编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书是由中国中车焊接和无损检测培训中心组织编写的磁粉检测人员资格鉴定考核的培训教材,按照 ISO/TR 25107《无损检测 无损检测人员培训大纲》、GB/T 9445《无损检测 人员资格鉴定与认证》和 EN 473/ISO 9712《无损检测 人员资格鉴定与认证》标准要求编写。

本书共 10 章,主要包括:磁粉检测物理基础、磁化技术、磁粉检测设备、磁粉检测器材、磁粉检测工艺、磁痕分析、常用零部件磁粉检测、轨道交通装备典型零部件磁粉检测应用、磁粉检测质量控制与安全防护、实验等。为了更好地掌握教材内容,本书还收录了国内外磁粉检测标准目录以及常用材料的磁性参数与磁粉检测常用单位制及换算等内容。

本书的特点是,既注重理论与实践应用的结合,又紧跟现代科技技术的发展,并及时介绍国内、外磁粉检测的新观点和新技术。本书除作为磁粉检测人员资格鉴定考核培训教材外,也可供各企业生产一线人员、质量管理人员、安全监督人员、工艺技术人员、研究机构、大专院校相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

磁粉检测技术及应用 / 万升云等编著. —北京:

机械工业出版社, 2018.3

轨道交通装备无损检测人员资格培训及认证系列教材

ISBN 978-7-111-59218-1

I. ①磁… II. ①万… III. ①磁粉检验—技术培训—

教材 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 035260 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:张维官 责任校对:王 颖

版式设计:张 硕 封面设计:桑晓东

北京顶佳世纪印刷有限公司印制

2018 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

185mm×260mm·17 印张·396 千字

0001—3600 册

ISBN 978-7-111-59218-1

定价:38.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

封面无防伪标均为盗版

前 言

磁粉检测是无损检测常规方法之一，也是应用最广泛、最成熟的方法。目前广泛应用于轨道交通、航空、军工、造船、冶金、机械等行业，在设备和装备制造、检修、运行、产品质量的保证、提高生产率、降低成本等领域正发挥着越来越大的作用。

磁粉检测应用的正确性、规范性、有效性及可靠性，一方面取决于所采用的技术和装备水平，另一方面更重要的是取决于检测人员的知识水平和判断能力。无损检测人员所承担的职责要求他们具备相应的无损检测理论知识和综合技术素质。因此，必须制订一定的规则和程序，对磁粉检测相关人员进行培训与考核，鉴定他们是否具备这种资格。

为进一步提高轨道交通装备行业无损检测技术保障水平和能力，研究并建立与国际惯例接轨，适应新时期发展需要的轨道交通行业无损检测人员合格评定制度势在必行。目前有关磁粉检测方面的著作，国内、外品种较多，但适用于轨道交通行业无损检测人员资格鉴定与认证要求的教材，尤其是供培训使用及参考的资料几乎没有。为此，中国中车焊接和无损检测培训中心组织行业专家编写了这本教材。

全教材共分磁粉检测物理基础、磁化技术、磁粉检测设备、磁粉检测器材、磁粉检测工艺、磁痕分析、常用零部件磁粉检测、轨道交通装备典型零部件磁粉检测应用、磁粉检测质量控制与安全防护、实验等10章。本书通俗易懂，简明扼要，图文并茂，是广大磁粉检测人员培训、日常检测必备工具书，也可作为设计、工艺、管理及检验人员了解磁粉检测的参考资料。

本教材结合技能操作人员的特点，力求实用，并尽量与欧盟及国际上通行的各国无损检测等级技术培训及认证要求相适应。

本书编写过程中，中车科技质量部、中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司

各级领导及中车无损检测技术委员会各位委员提供了宝贵的建议和各方面支持，在此向他们表示真诚的谢意。

由于作者水平有限，难免存在诸多不足和错误之处，恳请培训教师和学员以及读者不吝指正。愿本教材能够为轨道交通装备行业无损检测人员水平的提高，保证无损检测技术的正确应用和促进无损检测专业的发展起到积极的推动作用。

本教材参考了国内同类教材和培训资料，谨此致谢前人及同行。

编者

2017年12月16日

目录

前言

1 磁粉检测物理基础	1
1.1 磁学的基本概念	1
1.1.1 磁场	1
1.1.2 磁力线和磁感应线	1
1.1.3 磁场强度	2
1.1.4 磁感应强度	2
1.1.5 磁通量	3
1.1.6 磁导率	3
1.2 铁磁性材料	4
1.2.1 磁介质	4
1.2.2 磁畴	4
1.2.3 磁化曲线	5
1.2.4 磁滞回线	6
1.3 电流的磁场	7
1.3.1 磁粉检测中常用的电流磁场	7
1.3.2 通电圆柱导体的磁场	8
1.3.3 通电钢管的磁场	12
1.3.4 钢管中心导体法磁化	13
1.3.5 通电线圈的磁场	14
1.3.6 环形件绕电缆的磁场	16
1.4 退磁场	16
1.4.1 退磁场的概念	16

1.4.2 影响退磁场大小的因素	17
1.5 磁路与磁感应线的折射	19
1.5.1 磁路	19
1.5.2 磁感应线的折射	20
1.6 漏磁场	20
1.6.1 漏磁场的形成	20
1.6.2 不连续的漏磁场分布	21
1.6.3 影响漏磁场的因素	22
1.7 钢材磁性	24
1.7.1 钢材的分类	24
1.7.2 钢材的磁性	24
1.7.3 影响钢材磁性的主要因素	25
1.8 磁粉检测的光学基础	25
1.8.1 光度量术语及单位	25
1.8.2 发光	26
1.8.3 紫外线	27
1.8.4 人眼对光的响应	27
2 磁化技术	29
2.1 磁化电流	29
2.1.1 交流电	30
2.1.2 直流电	31
2.1.3 整流电	31
2.1.4 冲击电流	33
2.1.5 磁化电流的选用原则	33
2.2 磁化方法	33
2.2.1 磁化方法的分类	34
2.2.2 各种磁化方法的特点	35
2.3 磁化规范	47
2.3.1 国内磁化规范及其制定	47

2.3.2 各种方法的磁化规范	49
2.3.3 ISO 9934标准关于磁化规范的要求	53
3 磁粉检测设备	55
3.1 磁粉探伤机的命名方法	55
3.2 磁粉检测设备的分类	56
3.2.1 固定式磁粉探伤机	56
3.2.2 移动式磁粉探伤机	57
3.2.3 便携(携带)式磁粉探伤机	58
3.2.4 专用及半自动磁粉探伤机	59
3.3 磁粉检测设备的主要组成	60
3.3.1 磁化电源装置	60
3.3.2 工件夹持装置	63
3.3.3 指示与控制装置	63
3.3.4 磁粉和磁悬液喷洒装置	63
3.3.5 照明装置	64
3.3.6 退磁装置	66
3.3.7 磁粉检测图像自动识别系统	67
3.4 检测设备的安装、使用与维护	67
3.4.1 磁粉探伤机的选择与安装	67
3.4.2 磁粉探伤机的使用	69
3.4.3 磁粉探伤机的维护与保养	70
3.5 磁粉检测用测量仪器	70
3.5.1 特斯拉计(高斯计)	70
3.5.2 袖珍式磁强计	71
3.5.3 照度计、紫外辐射照度计	71
3.5.4 通电时间测量器	72
3.5.5 弱磁场测量仪	72
3.5.6 快速断电试验器	72
3.6 轨道交通装备制造企业常用典型设备	72

3.6.1	轴承内外圈磁粉探伤机	72
3.6.2	轮对磁粉探伤机	73
3.6.3	车轴荧光磁粉探伤机	73
3.6.4	旋转磁场井式车钩零件探伤机	74
3.6.5	悬吊件磁粉探伤机	74
3.6.6	货车摇枕侧架磁粉探伤机	75
3.6.7	齿轮磁粉探伤机	75
3.6.8	转向架构架整体磁化探伤机	76
4	磁粉检测器材	77
4.1	磁粉	77
4.1.1	磁粉的分类	77
4.1.2	磁粉的性能及测试	78
4.2	载液	85
4.2.1	油性载液	85
4.2.2	水载液	85
4.3	磁悬液	86
4.3.1	磁悬液浓度	86
4.3.2	磁悬液浓度快速测定	87
4.3.3	磁悬液配制	87
4.4	反差增强剂	89
4.4.1	应用	89
4.4.2	配方、施加及清除	89
4.5	标准试片与标准试块	90
4.5.1	标准试片	90
4.5.2	标准试块（B型、E型、1型、2型）	94
4.5.3	自然缺陷试块和专用试块	98
4.5.4	提升力试块	98
5	磁粉检测工艺	99
5.1	磁粉检测方法分类	99

5.1.1 磁粉检测的分类方法	99
5.1.2 连续法和剩磁法	100
5.1.3 干法和湿法	102
5.1.4 荧光磁粉检测与非荧光磁粉检测	103
5.1.5 磁粉检测——橡胶铸型法	103
5.1.6 磁橡胶法	104
5.2 磁粉检测程序	104
5.2.1 检测时机	104
5.2.2 预处理	105
5.2.3 磁化、施加磁粉或磁悬液	106
5.2.4 磁痕观察、记录与缺陷评级	106
5.3 退磁	107
5.3.1 剩磁的产生与影响	108
5.3.2 退磁的原理	108
5.3.3 退磁方法和退磁设备	109
5.3.4 退磁注意事项	111
5.3.5 剩磁测量	112
5.4 后处理与合格工件的标记	112
5.4.1 后处理	112
5.4.2 合格工件的标记	112
5.5 超标缺陷磁痕显示的处理和复验	113
5.6 检测记录和检测报告	113
5.7 影响磁粉检测灵敏度的主要因素	114
5.7.1 磁化	114
5.7.2 磁介质	115
5.7.3 设备性能	117
5.7.4 工件材质、形状尺寸和表面状态	117
5.7.5 缺陷自身的因素	119
5.7.6 工艺操作	119
5.7.7 检测人员素质	120

5.7.8 检测环境的条件 120

5.8 磁粉检测作业指导书的编制 122

6 磁痕分析 127

6.1 磁痕分析的意义 127

6.1.1 什么是磁痕 127

6.1.2 磁痕的分类 127

6.1.3 磁痕分析的意义 128

6.1.4 磁痕分析的方法 128

6.2 相关磁痕 129

6.2.1 原材料缺陷及磁痕特征 129

6.2.2 铸造缺陷及磁痕特征 130

6.2.3 锻造缺陷及磁痕特 133

6.2.4 焊接缺陷及磁痕特征 135

6.2.5 热处理缺陷及磁痕特征 136

6.2.6 机加工缺陷及磁痕特征 138

6.2.7 在役缺陷磁痕显示特征及分析 139

6.3 非相关磁痕 139

6.4 伪磁痕 143

7 常用零部件磁粉检测 145

7.1 焊接件磁粉检测 145

7.1.1 焊接件检测的内容与范围 145

7.1.2 检测方法选择 146

7.1.3 焊接件检测实例 146

7.2 锻钢件磁粉检测 151

7.2.1 锻钢件检测的特点 151

7.2.2 锻钢件检测方法选择 152

7.2.3 锻钢件检测实例 152

7.3 铸钢件磁粉检测 155

7.3.1 铸钢件检测的特点 155

7.3.2 铸钢件检测实例	155
7.4 在役与维修件磁粉检测	156
7.4.1 在役与维修件磁粉检测的特点	156
7.4.2 在役与维修件检测实例	156
7.5 特殊工件的磁粉检测	157
7.5.1 带覆盖层工件	157
7.5.2 需要检查内腔的工件	158
7.5.3 过渡级钢和超高强度钢在磁粉检测中遇到的问题	159
7.5.4 板弯型材磁粉检测	160
7.5.5 带螺纹或键槽的工件	161
7.5.6 异形件磁粉检测	161
8 轨道交通装备典型零部件磁粉检测应用	162
8.1 车轴（轮对）磁粉检测	162
8.1.1 车轴（轮对）	162
8.1.2 车轴（轮对）磁粉检测	165
8.2 车轮的磁粉检测	169
8.2.1 车轮的制造工艺	169
8.2.2 检测工艺要点	169
8.3 齿轮的磁粉检测	172
8.3.1 齿轮的制造工艺	172
8.3.2 齿轮磁粉检测	173
8.4 机车车辆用制动盘磁粉检测	176
8.4.1 机车车辆用制动盘	176
8.4.2 制动盘磁粉检测	177
8.5 轴承零件磁粉检测	178
8.5.1 轴承概述	178
8.5.2 轴承生产及检修	179
8.5.3 轴承磁粉检测	179
8.6 摇枕侧架磁粉检测	183

8.6.1 概述	183
8.6.2 制造工艺流程	184
8.6.3 磁粉检测	184
8.7 车钩缓冲装置磁粉检测	187
8.7.1 概述	187
8.7.2 制造工艺流程	188
8.7.3 钩体、钩舌、钩尾框磁粉检测	189
8.7.4 缓冲器箱体磁粉检测	192
8.8 钢制螺旋弹簧磁粉检测	193
8.8.1 弹簧概述	193
8.8.2 钢制螺旋弹簧制造工艺	194
8.8.3 钢制螺旋弹簧磁粉检测	194
9 磁粉检测质量控制与安全防护	199
9.1 磁粉检测质量控制	199
9.1.1 概述	199
9.1.2 人员资格控制	199
9.1.3 设备与仪器控制	199
9.1.4 材料有效性控制	200
9.1.5 系统综合性能实验	203
9.1.6 文件记录与工艺方法控制	203
9.1.7 检测环境的控制	204
9.1.8 质量控制周期	205
9.2 安全防护	206
9.2.1 概述	206
9.2.2 机械与操作安全	206
9.2.3 电气安全	207
9.2.4 磁粉检测器材的安全使用	209
9.2.5 防火防爆安全	209

10 实验	211
10.1 通电圆柱导体周围的磁场分布测试	211
10.2 螺管线圈磁场分布和有效磁化范围的测试	212
10.3 线圈开路磁化 L/D 值对退磁场影响的实验	213
10.4 触头法磁场分布和有效磁化范围测试	214
10.5 磁轭法和交叉磁轭法有效磁化范围测试	215
10.6 干法和湿法检测灵敏度对比实验	216
10.7 检测介质的检测	217
10.8 对检测室的白光照度和紫外辐照度的测试	218
10.9 退磁方法和退磁效果实验	219
10.10 磁悬液浓度和污染实验	220
10.11 磁粉检测综合性能实验	220
10.12 焊接产品的磁粉检测	221
10.13 铸(锻)件产品的磁粉检测	224
附录A 国内外常用磁粉检测标准目录	227
附录B 部分常用钢材磁特性	233
附录C 磁粉检测使用的单位制及换算关系	236
参考文献	239

1 磁粉检测物理基础

1.1 磁学的基本概念

1.1.1 磁场

磁体与磁体之间、磁体与铁磁性物体之间，即使是不直接接触也有磁力吸引作用，这是由于磁体周围存在着磁场，磁体间的相互作用是通过磁场来实现的。磁场是磁体或通电导体周围具有磁力作用的空间。磁场存在于磁体或通电导体的内部和周围。一般用磁力线、磁感应线、磁场强度、磁感应强度和磁通量来表示磁场的方向和大小。

1.1.2 磁力线和磁感应线

为了形象地描述磁场的大小、方向和分布情况，可以在磁场范围内，借助小磁针描述条形磁铁的磁场分布，画出许多条假想的连续曲线，称为磁力线或者磁感应线，如图1-1~图1-4所示。在真空中称为磁力线，在磁介质中称为磁感应线。

磁力线（磁感应线）具有以下特性：①具有方向性的闭合曲线。在磁体内，由S极到N极；在磁体外，由N极出发，穿过空气进入S极的闭合曲线。②互不相交。③可描述磁场的大小和方向。④沿磁阻最小路径通过。

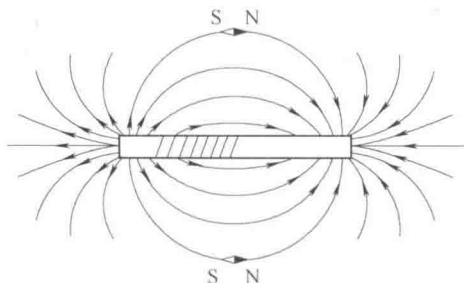


图1-1 条形磁铁的磁力线分布

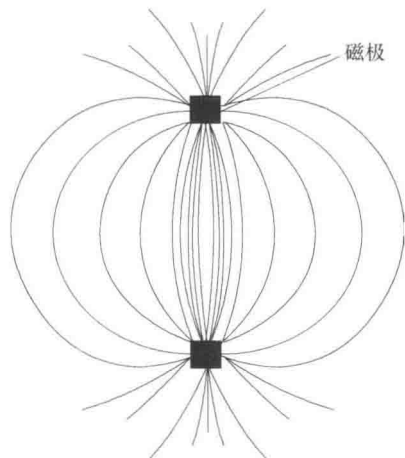


图1-2 马蹄形磁铁的磁力线分布

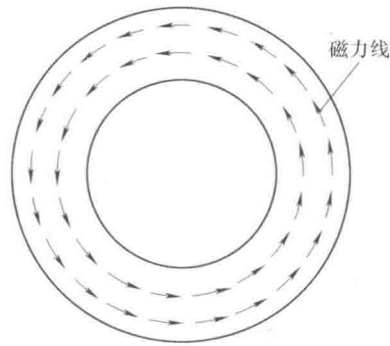


图1-3 圆周磁场的磁力线分布

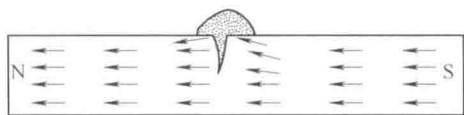


图1-4 纵向磁场的磁力线分布

1.1.3 磁场强度

表征磁场大小和方向的物理量称为磁场强度。磁场强度用符号 H 来表示，在SI单位制中，磁场强度的单位是安[培]/米（A/m），在CGS单位制中，磁场强度的单位是奥[斯特]（Oe），其换算关系为：

$$1\text{ A/m} = 4\pi \times 10^{-3}\text{ Oe} \approx 0.0125\text{ Oe}$$

$$1\text{ Oe} = \frac{10^3}{4\pi} = 80\text{ A/m}$$

为了形象地表示磁场中 H 矢量的分布，常用磁力线（磁感应线）表示。磁力线（磁感应线）上任一点的切线方向和该点 H 矢量的方向相同，磁力线（磁感应线）的疏密程度代表 H 矢量的大小，磁力线（磁感应线）越密，表示 H 越大，磁力线（磁感应线）越疏，表示 H 越小。

1.1.4 磁感应强度

将原来不具有磁性的铁磁性材料放入外加磁场内得到磁化，它除了原来的外加磁场外，在磁化状态下铁磁性材料自身还产生一个感应磁场，这两个磁场叠加起来的总磁场，称为磁感应强度，用符号 B 表示。磁感应强度和磁场强度一样，具有大小和方向，可以用磁感应线表示。通常把铁磁性材料中的磁力线称为磁感应线。

在SI单位制中，磁感应强度的单位是特[斯拉]（T），在CGS单位制中，磁感应强度的单位是高[斯]（Gs），其换算关系为：

$$1\text{ T} = 10^4\text{ Gs}$$

$$1\text{ Gs} = 10^{-4}\text{ T}$$

地球磁场的数量级大约是 10^{-4} T ，地球表面的磁场在赤道处为 $0.3 \times 10^{-4}\text{ T}$ ，在两极处为

$0.6 \times 10^{-4} \text{ T}$, 大型的电磁铁能激发出约为 2 T 的恒定磁场, 超导磁体能激发出高达 25 T 的磁场。

1.1.5 磁通量

在磁场中, 垂直通过某一截面(或曲面)的磁力线的条数, 称为通过该截面(或曲面)的磁通量, 用 Φ 表示, 如图 1-5a 所示。在曲面上的面积单元 dS , 如图 1-5b 所示, dS 的法线方向与该点处磁感应强度方向之间的夹角为 θ , 则通过面积单元 dS 的磁通量为

$$d\Phi = B \cos \theta dS$$

所以, 通过有限曲面 S 的磁通量为

$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

磁通量的单位为 $\text{T} \cdot \text{m}^2$, 叫做韦伯 (Wb)。

在 SI 单位制中, 磁通量的单位是韦[伯] (Wb), 在 CGS 单位制中, 磁通量的单位是麦[克斯韦] (Mx), 1 麦[克斯韦]表示通过 1 根磁力线, 两者间换算关系为:

$$1 \text{ 韦[伯] } (\text{Wb}) = 10^8 \text{ 麦[克斯韦] } (\text{Mx})$$

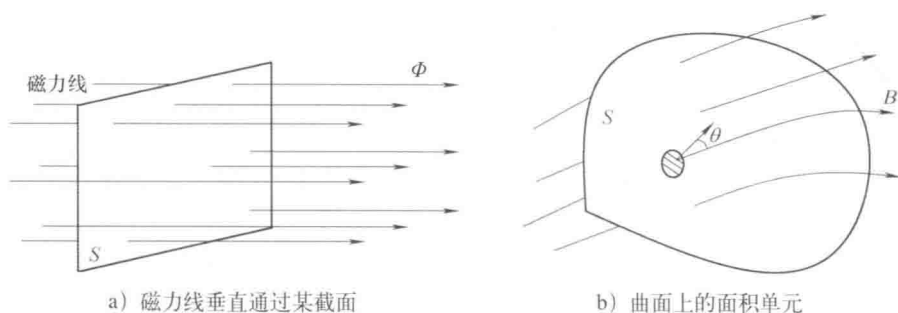


图 1-5

磁感应线上每点的切向方向代表该点的磁感应强度的方向, 磁感应强度的大小等于垂直穿过单位面积上的磁通量, 因此磁感应强度又称为磁通密度。

1.1.6 磁导率

磁感应强度 B 与磁场强度 H 的比值称为磁导率, 或称为绝对磁导率, 用符号 μ 表示, $B = \mu H$ 。磁导率表示材料被磁化的难易程度, 它反映了材料的导磁能力。在 SI 单位制中, 磁导率的单位是亨[利]/米 (H/m), 在 CGS 单位制中磁导率是纯数。磁导率 μ 不是常数, 而是随磁场大小不同而改变的变量, 有最大值和最小值。

真空磁导率是一个恒定值, 用 μ_0 表示, 在 SI 单位制中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, 在 CGS 单位制中, $\mu_0 = 1$ 。

为了比较各种材料的导磁能力, 把任何一种材料的磁导率和真空磁导率的比称为该物质的相对磁导率, 用符号 μ_r 表示, μ_r 为一纯数, 无量纲。

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (1-1)$$