

磁粉与渗透探伤

李 忠 黄方道

目 录

第一部分 磁粉探伤

第一章 绪论	1
第二章 磁粉探伤原理	4
第一节 磁粉检验的物理基础	4
第二节 磁粉探伤原理	7
第三章 磁粉探伤方法的分类	10
第四章 磁化方法和磁化规范	12
第一节 磁化电流	12
第二节 磁化方法及其磁化规范	17
第五章 磁粉探伤材料和设备	30
第一节 磁粉和磁悬液	30
第二节 标准试块(片)	35
第三节 磁粉探伤设备	39
第四节 设备附件	42
第五节 辅助测量仪表	43
第六章 磁粉探伤工艺	47
第一节 探伤前的准备工作	47
第二节 磁粉探伤方法的选择	50
第三节 工件的磁化	52
第四节 磁粉或磁悬液的施加	54
第五节 磁痕的观察与识别	55
第六节 退磁	59

第七节	探伤记录及安全注意事项	61
第八节	磁粉检测在航空维修中的应用	62
第七章	磁粉探伤实验	66
实验一	白光强度和紫外光强度的测定	66
实验二	综合性能实验	67
实验三	工件表面磁场强度的测试	69
实验四	灵敏度试片的使用	70
实验五	磁悬液磁粉浓度的测定	72
实验六	固定式磁粉探伤机的应用和测试	74
实验七	工件 L/D 值对退磁场的影响	75
实验八	支杆法磁化磁场分布的测试	76
实验九	偏置芯棒法的磁化方法和磁化效果	77
实验十	退磁方法与退磁效果试验	79
实验十一	磁性称量法测量磁粉磁性	80
附表 1	磁粉探伤质量控制	83
附表 2	磁粉探伤报告	84

第二部分 渗透探伤

概 述	85
第一章 液体渗透检验的物理基础	86
第一节 毛细作用	87
第二节 紫外线和荧光	89
第二章 渗透检验所用的材料	90
第一节 液体渗透剂	90
第二节 显像剂与去除剂	95

第三节	去除剂	98
第三章	渗透检验基本步骤及常用检验方法	99
第一节	表面准备和预清洗	99
第二节	渗透	101
第三节	去除表面多余的渗透剂	101
第四节	干燥	102
第五节	显像	103
第六节	检验	104
第七节	常用检验方法	105
第四章	显示的解释和缺陷的评定	111
第一节	显示的分类	111
第二节	真实显示的分类	112
第三节	缺陷的分类及常见缺陷	113
第四节	缺陷的评定	115
第五章	渗透检验常用设备及材料、设备的质量控制	117
第一节	渗透检验装置	117
第二节	渗透检验材料和设备的质量控制	120
第三节	常用的材料、设备性能检验	123

第一章 绪 论

一、概况

磁粉检测是通过铁磁性材料的磁性变化来探测铁磁性材料工件表面和近表面是否有缺陷的一种无损检测方法。

关于磁粉探伤的设想是美国人霍克于 1922 年提出的,他在切削钢件的时候,发现铁末聚集在工件上的裂纹区域。于是,他第一个提出可利用磁铁吸引铁屑这一人所共知的物理现象,进行探伤。但是受到当时磁化技术的限制以及缺乏合格的磁粉,他的这一设想直至 1930 年才由瓦茨第一次成功地用于焊缝质量的检查。

前苏联全苏航空材料研究院的学者瑞加德罗毕生致力于磁粉探伤的研究和发展,作出了卓越的贡献。五十年代初期,他系统地研究了各种因素对探伤灵敏度的影响,在大量试验基础上制订了磁化规范。该规范在世界上具有广泛的影响,被许多国家采用和认可,我国各工业部门也大都以此为依据。我国学者对缺陷和激励磁场间相互作用所产生的漏磁场分布性、磁粉在漏磁场中的受力分析等理论问题的研究,取得了较大的进展。断裂力学在无损检测领域的应用,为制订更合理的磁粉探伤验收标准提供了依据。我国首创的磁粉探伤——橡胶铸型法为定量地检测内孔壁早期疲劳裂纹闯出了一条新路。而且,它还是记录磁粉探伤结果最良好的方法。

磁粉探伤可用于板材、型材、管材、锻造毛坯等原材料和半成品的检查,也可用于锻钢件、焊接件、铸钢件加工制造过程中工序间的检查和终加工检查,以及重要设备和机械、压力容器、石油贮罐的定期检查等。

磁粉检验法,在航空维修中不仅应用的历史最早,而且目前推广应用的范围也最广。在当前,无论是在外场维修中,还是在各大飞机修理厂中,对于钢磁材料零件表面缺陷的探伤检查,一般采用此法。

表 1—1 磁粉探伤的应用范围

应用范围	检验对象	可发现缺陷
成品检验	精加工后任何形状和尺寸的工作；热处理和吹砂后，不再进行机加工的工作；装备组合件的局部检验；	淬裂、磨裂、锻裂、发纹、非金属夹杂物和白点
半成品检验	吹砂后的锻钢件、铸钢件、棒材和管材	表面或近表面的裂纹、压折叠与锻折叠、冷隔、疏松和非金属夹杂物。
工序间检验	半成品在每道机加工和热处理工序后的检验	淬裂、磨裂、折叠和非金属夹杂物。
焊接件检验	焊接组合件、型材焊缝、压力容器等大型结构件焊缝	焊缝及热影响区裂纹。
返修检验	使用过的零部件	疲劳裂纹及其它材料缺陷。

二、磁粉检测的优缺点：

1. 优点

- ①显示直观，磁痕一般比裂纹尺寸大，易于观察。
- ②探测灵敏度高，最小缺陷宽度可达 0.1 微米。
- ③适应性好，对于几何形状复杂的工件，可以采用不同的磁化方法，对工件进行有效的全面检查。
- ④设备简单，成本低，操作方便，效率高。

2. 缺点

- ①只限于铁磁性材料的检查，主要包括碳钢、高强度合金钢、电工钢。

②只能够检查工件的表面及近表面缺陷，一般缺陷埋藏深度 2mm 以内。

③不能定量测出缺陷的深度。

④必须用人眼来观察，易造成操作人员的疲劳。

第二章 磁粉探伤原理

第一节 磁粉检验的物理基础

这里需要重点指出的是，任何一种无损检验方法，都有其特定的施用对象。对于磁粉检验来说它的适用对象仅限于铁磁性材料，不能不说是一大缺点。

一、材料的磁性

不同的材料具有不同的磁特性。各种钢材的磁特性也不相同，在磁粉探伤之前，首先要了解被探工件材质的磁特性以便选择正确的磁化方法。材料的磁特性往往用其磁化曲线来表示。不同材料的磁化曲线也各不相同。

材料的磁化曲线 $B-H$ 曲线，表示了该材料的磁感应强度 B 和磁场强度 H 之间的变化关系。

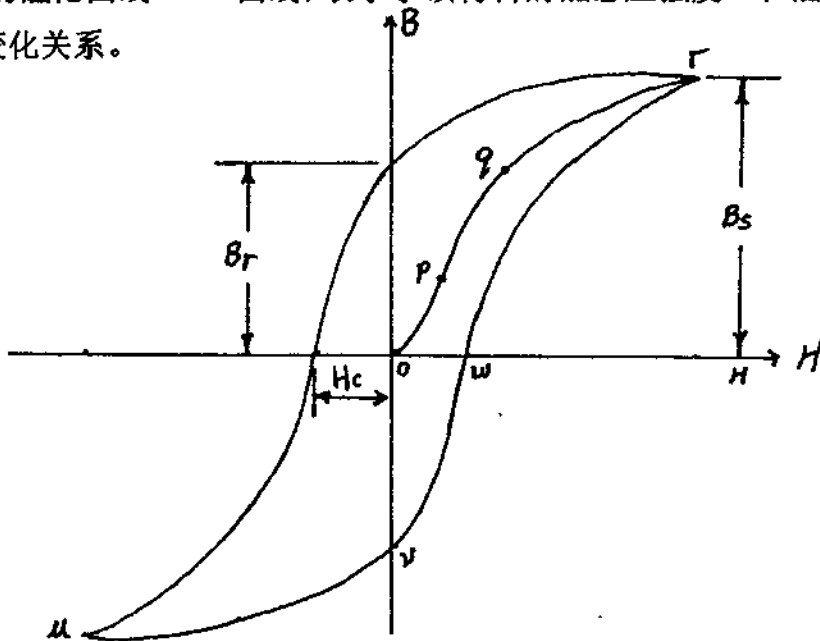


图 2—1 磁化曲线

由图 2—1 可见，在磁场强度 H 较小的地方磁感应强度 B 会缓慢地增加，当 H 增大到一定程度时， B 值便急剧上升，随后上升又变缓慢，以至到后来几乎就不增加了。这时表示铁磁体的磁性已经达到饱和，饱和点 r 处的 B 值叫做饱和磁感应强度 B_s ，曲线 $opqr$ 叫做初始磁化曲线（或原始磁化曲线），然后将 H 值减小， B 值由 r 点下降，但并不沿原来上升的曲线，而沿曲线 rs 下降返回，当 H 值减小到零时， B 值仍具有 os 的数值，即剩余磁感应强度 B_r 。若要使磁感应强度 B 减小到零，必须加上一个反向磁场 H_c ， H_c 称为矫顽力。若在反向继续增加磁场强度 H ，也会使 B 值在反方向上达到饱和（ μ 点）。再将 H 值沿正方向增加，则 B 值就沿 $uvwr$ 返回 r 点，形成一个闭合的磁化曲线，叫做磁滞回线。

由磁滞回线上 H 与 B 的变化关系可以看出，磁感应强度 B 的变化总是滞后于磁场强度 H 的变化，称之为磁滞现象。

二、影响材料磁性的因素

①含碳量：含碳量越低，其剩磁和矫顽力越小。

②热处理的影响：

淬火可提高矫顽力和剩余磁感应强度，而淬火后随着回火温度的升高，矫顽力有所下降。

③合金元素的影响：

在钢材中，由于合金元素的加入，会使材料的磁性被硬化，矫顽力增加。

④冷加工的影响：

材料在冷加工过程中，随着压缩变形率的增大，矫顽力和剩磁均有所增加。

三、铁磁材料的分类

磁化曲线是材料磁滞回线的一部分，材料不同，其磁特性也不相同。通常铁磁质材料，比较其磁特性的不同，矫顽力的大小，可以分为软磁性材料和硬磁性材料两大类。

从图 2—2 大家可看出，软磁性材料具有高磁导率、低磁阻、低剩磁和低矫顽力等特点，其磁滞回线是很狭窄的。而硬磁性材料的磁特性则恰恰相反。

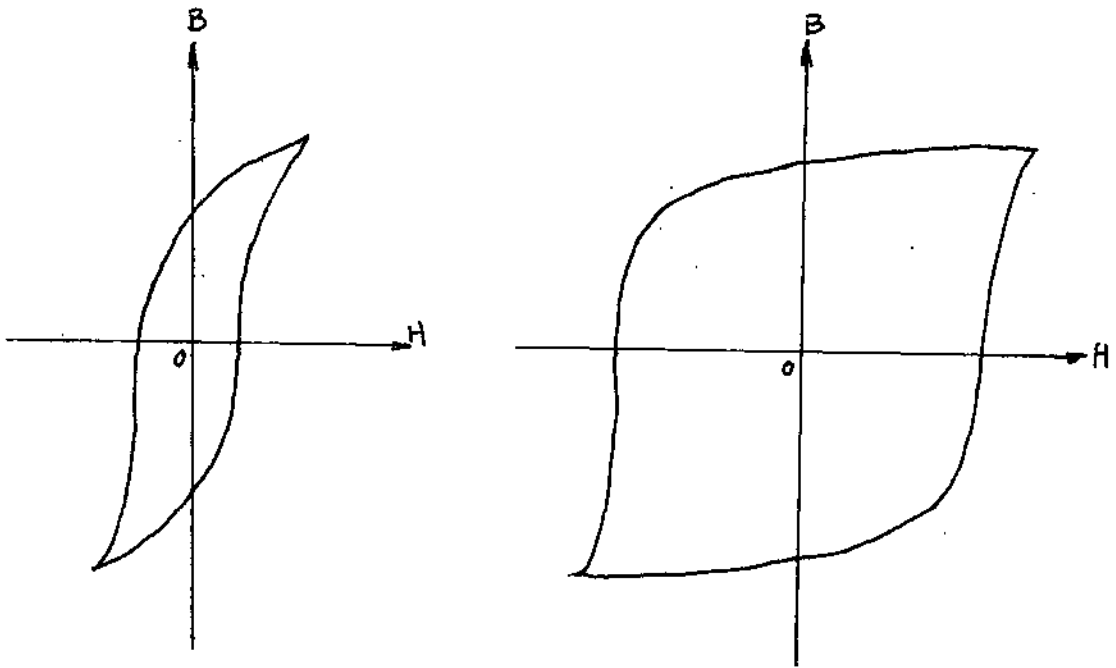


图 2—2 软、硬性材料磁滞回线形状对比

铁磁性材料 { 软磁性 —— 纯铁、低碳钢、低合金钢、退火后的中碳钢。
硬磁性 —— 铬钢、合金钢、淬火钢、铝镍铁合金等。

第二节 磁粉探伤原理

一、漏磁场

在描述什么是漏磁场前，先介绍一个专业名词——不连续性，即由于铁磁性材料性质突变，导致正常均匀分布的磁场发生畸变，也就是我们通常所说的缺陷。

当对铁磁性工件进行磁粉探伤时，若工件表面或近表面存在因缺陷造成的金属不连续时，缺陷部位的磁导率要比铁磁性材料完好部分低得多，因此其磁阻抗要比连续部分有明显上升，工件内的磁力线将优先从工件内通过，但当工件内的磁感应强度或缺陷尺寸大到一定程度时，磁力线就会从缺陷部位泄漏到空气中去产生漏磁场。

所谓漏磁场，就是在被磁化了的工件表面缺陷处产生磁通泄漏而建立的磁场。

二、影响漏磁场大小的因素

1. 磁化强度

如果外加磁场太小，磁力线极易在磁阻很小的钢材中通过，几乎不泄漏于空中，无法产生有效的漏磁场。但如果将外加磁场增大至超过工件的饱和磁感应强度的话，就会使泄漏于空气中的磁通急剧增加，甚至钢材表层金相组织的微观差异也会产生漏磁场，往往会产生一些伪缺陷磁痕，造成误判。

2. 缺陷方向、位置和尺寸的影响

- ①方向 { 缺陷与磁化方向垂直——显示效果最好、漏磁场最强
 { 缺陷与磁化方向平行——漏磁场近似为零
 { 与磁化方向成45—135度夹角——可产生有效漏磁场

②位置：就同样的缺陷来说，越靠近表面则漏磁通越大。位于深处则几乎没有漏磁通泄漏于空间。

③形状：缺陷的深度与宽度的比值(深宽比)越高，则漏磁场就越强，缺陷越容易发现。

3. 材料的磁性

一般说来，软磁性材料较硬磁性材料易于产生漏磁场。

4. 磁化电流种类的影响

谈到磁化电流即直流电和交流电对漏磁场的影响，先要提及的是交流电的趋肤效应，就是说在通有交流电的导体中，电流在导体中的分布并非均匀的，而是越靠近表面，电流密度越大，如图 2—3A 所示。因此采用交流电磁化工件时，工件上的磁力线密度由表向里逐渐降低，就是说对于埋藏深度较深的缺陷，交流磁化产生的漏磁通将较弱。相反，直流磁化时，由于几乎不存在趋肤效应，磁场渗透较深，即探测深度较交流磁化为深，但对于表面和近表面缺陷的灵敏度又不如交流磁化高。如图 2—3B 所示。

探伤人员必须了解影响缺陷漏磁场的各种因素，探伤时根据具体情况，例如工件材质和状态及常见缺陷的性质和特征等，来选择适当的磁化方式、磁化电流的种类和大小，才能得到较理想的探伤效果。

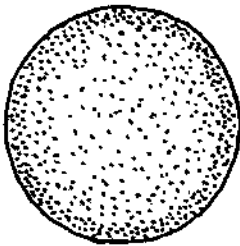


图 2—3A

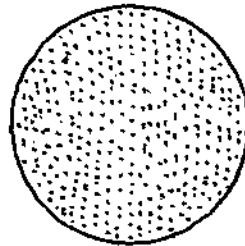


图 2—3B

图 2—3 交流电的趋肤效应

三、磁粉探伤原理

在了解了漏磁场以及影响它的各种因素后就可以总结磁粉探伤原理如下：

当铁磁性零件被磁化时，在零件表面的非连续处会产生漏磁场，这个漏磁场与施加的磁粉相互作用而形成了磁痕，磁粉探伤就是利用观察磁痕

的有无及其形貌来判断被检工件上是否存在缺陷以及缺陷的大小的探伤方法。由于漏磁场的作用范围要比实际缺陷宽度大数倍至数十倍，所以磁痕的宽度也比真实缺陷宽得多，很容易观察出来。

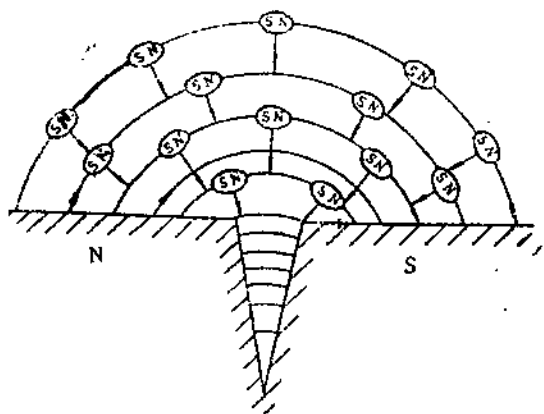


图 2—4 磁粉探伤原理

第三章 磁粉探伤方法的分类

一、按施加磁粉的时间分为：

1. 连续法——在磁化进行的同时，在被检工件上施加磁悬液，并进行评判。
2. 剩磁法——在除去磁化磁场后，利用剩磁来检测。

二、按磁粉的分散介质分为：

1. 干法——磁粉在干燥状态下，以干粉形式分散在空气中进行探伤。
2. 湿法——将磁悬液分散在适当的液体介质中呈悬浮状态，施加在探伤工件表面进行检测。

三、按磁化电流的种类分为：

1. 交流磁化法
2. 直流磁化法
3. 脉冲电流磁化法
4. 冲击电流磁化法

四、按工件的磁化方向分为：

1. 轴向磁化法——通过外加磁场或磁化电流将工件进行轴向磁化，此时被探工件内的磁场方向是轴向的，也称为纵向磁化法。
2. 周向磁化法——通过外加磁场或磁化电流将工件进行周向磁化，磁场方向是周向的。
3. 复合磁化法——通过几种不同的磁化方法，对工件进行两个或两个以上不同方向的磁化方法。如摆动磁化法。

4. 旋转磁化法——采用两个不同方向和不同相位的交变磁场对被探工件进行旋转磁化，此被探工件的磁化方向是随时间而旋转变化的。

第四章 磁化方法与磁化规范

在前面了解了磁粉探伤的原理及几种探伤方法的分类，就可以看出，工件磁化是磁粉探伤必不可少的一个操作程序。在探伤前，必须根据探伤对象和探伤要求正确选择磁化电流、磁化方法和磁化规范，否则就不会收到理想的探伤效果。

所谓磁化，就是在被探工件上施加一定方向和一定大小的磁场。磁化操作一定要抓住磁化方向和磁化程度两个重要环节，它们将决定被探工件内的磁场方向和磁场强度的大小，即关系到漏磁场的产生，对探伤效果会产生直接影响。

磁化程度的大小是由磁化规范的选择来决定的，而磁化规范是通过调节磁化电流值的大小来控制的。如果对被探工件施加的磁场强度太小，工件中没有足够的磁通密度，即使缺陷与磁化方向垂直，大部分磁力线绕过缺陷而从工件中通过，因此，不会产生较多的漏磁通，不足以形成清晰的缺陷磁痕。反之，过强的磁场强度又会出现假磁痕，特别当采用直接通电法时磁化电流过高容易烧伤工件。

下面将具体分析对于不同的被探工件，应选择的磁化电流和磁化方法，并根据不同的磁化方法，定出相应的磁化规范。

第一节 磁化电流

磁化电流就是为使被探工件磁化而施加的电流。通常使用的磁化电流

有交流、直流、脉动电流和冲击电流等几种，见图 4—1。在民航维护中常用的是交流和直流，结合实际情况，这里重点介绍交流和直流。

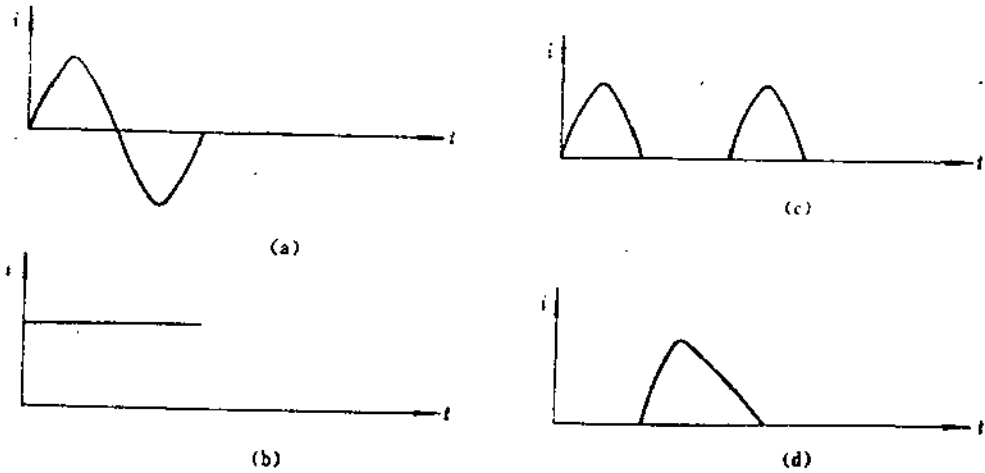


图 4—1 磁化电流的种类

一、交流电

交流电就是大小和方向随时间作有规律的变化了的电流。正弦交流电是指大小和方向随时间按照正弦规律变化的电流，见图 4—1a。

在磁粉探伤中，交流电的应用十分广泛，采用交流电进行磁粉探伤具有如下优点：

1. 对工件表面缺陷的检测灵敏度高。

在交流磁化探伤中，由于交流电的趋肤效应，磁力线往往集中于工件表层，渗透深度较浅，对埋藏在表皮下深处的缺陷很难检查出来，但对工件表面缺陷的检测灵敏度却较高。工件表面裂纹对使用安全具有很大威胁，灵敏而可靠地检出工件表面裂纹对确保飞行安全具有相当重要的意义。

2. 可实现感应磁化和旋转磁化

由于交流电具有大小和方向均随时间而交变的特点，采用交流电可以实现感应电流法和旋转磁场法磁化被探工件，进行磁粉探伤。