

# 磁性无损检测技术中的磁化技术\*

康宜华 武新军 杨叔子

(华中理工大学机械学院, 武汉 430074)

**摘要** 论述了磁性无损检测技术中磁化被测构件的方法、磁化场强度的选择、励磁磁路分析以及磁化器的优化设计等问题。

**关键词** 磁性检验 磁化 磁路 磁场强度

## MAGNETIZING TECHNOLOGY IN MAGNETIC NONDESTRUCTIVE TESTING

Kang Yihua Wu Xinjun Yang Shuzi

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan)

**Abstract** Magnetizing technology in magnetic nondestructive testing is discussed including the magnetizing of the part tested, choice of field intensity, exciting circuit analysis and optimized design of magnetizer.

**Keywords** Magnetic inspection Magnetization Magnetic circuit Field intensity

在磁性无损检测技术中磁化是实现检测的第一步,它决定着被测量对象(如裂纹)能否产生出足够的可被测量和可被分辨的磁场信号,同时也影响着检测信号的性能特性和检测装置的结构特性。被测构件的磁化由磁化器实现,主要包括磁场源和磁回路等几个主要部分,因此,针对被测构件的结构特点和测量目的,选择源磁场和设计磁回路是磁化器优化设计的关键。本文从磁化方式、磁化强度选择、磁路分析以及磁化器结构设计等几个方面对磁性检测技术中的磁化技术进行了论述。

### 1 磁化方式

磁化方式按所用励磁磁源分为下述几种:

(1) 交流磁化 在被测构件中,交流磁场易产生集肤效应和涡流,且磁化的深度随电流频率的增高而减小,因此在 MLF 法中这种磁化方法只能检测构件表面或近表层裂纹等缺陷,但交流磁化强度容易控制,大功率 50Hz 交流电流源易于获得,磁化器结构简单,成本低廉。

(2) 直流磁化 分为直流脉动电流磁化法和直流恒定电流磁化法。前者在电气实现上比后者简单,一般用于剩余磁场检测法中构件的磁化,在有源磁

场检测中,这一磁化会在检测信号中产生很强的交流磁场信号,增加检测信号处理的复杂性,降低检测信号的信噪比。直流恒定电流磁化法对电流源具有较高的要求,激励电流一般为几安培甚至上百安培。与交流磁化方式一样,直流磁化法磁化强度可通过控制电流的大小方便地调节,但随着连续使用时间的加长,电磁铁的发热是难以避免的。

(3) 永磁磁化 永磁磁化以永久磁铁作为励磁源,它是一种不需电流源的磁化方式,与直流恒定电流磁化方式具有相同的特性,但在磁化强度的调整上不及直流磁化方式方便,其磁化强度一般通过磁路设计来保证。

在永磁磁化方式中,永久磁铁可以采用永磁铁氧体、铝镍钴永磁及稀土永磁等,永磁铁氧体价格低廉、矫顽力高但剩磁低;铝镍钴永磁剩磁高但矫顽力低;稀土永磁价格较贵,但矫顽力很大,剩磁较高,是永磁材料发展上的第三代材料<sup>[1]</sup>。对于不同的永久磁铁,在磁路设计上应根据各自的磁特性,充分发挥其优点,以使磁路达到最优<sup>[2]</sup>。

由于永久磁铁,特别是稀土永磁,具有磁能积高、体积小、重量轻及无需电源等特点,在磁性检测中将得到很好的应用。以永久磁铁为磁源的磁性检测装置具有使用方便、灵活、体积小及重量轻等特点,所以永磁磁化方式是在线磁性检测设备中磁化被测构件的优选方式。

\* 国家重点科技项目 85-308-07-04(5)和华中理工大学青年基金资助项目

在励磁磁源选择后,随着磁源在磁路中的布置位置不同又可产生多种方法。在这些方法的实施中软磁材料是不可缺少的,起着引导磁场和减小磁阻等作用。软磁材料有电工钢片、坡莫合金、工业纯铁和低碳钢等。在交流磁化中选用电工钢片;在恒定磁场磁化中可选择多种软磁材料,其中以工业纯铁和低碳钢价格最便宜,且机械加工性能较好<sup>[3]</sup>。但注意,其中通过的磁感应强度应 $<2T$ 。在磁路设计中软磁材料截面尺寸的选择以不产生饱和为原则,确保软磁材料的高磁导率。

(4) 复合磁化<sup>[4,5]</sup> 在上述几种磁化方式中,一个独立的磁化回路只能沿某一方向磁化铁磁构件,即单向磁化。单向磁化在检测中存在不足,例如,MLF法测量铁磁构件中的裂纹而磁化方向垂直于裂纹走向时,其产生的漏磁场信号最大,而当它平行于裂纹走向时,漏磁场很小,甚至微弱到难以检测。为能对不同走向的裂纹等缺陷的检测获得最大且相同的灵敏度,可让磁化场方向周期性变化,这就必须采用复合磁化方法。复合磁化时将直流磁场与直流磁场、直流磁场与交流磁场、交流磁场与交流磁场成一定角度(如相互垂直)合成磁场,从而形成所需方向或不断变化的可控的磁化方向来磁化构件。显然,这类磁化器的结构复杂,且控制电路要求较高。

(5) 综合磁化 在某些测量中(如MMF检测),直流磁场难以激发出检测信号,而只用交流磁化又会受到磁导率急剧变化的影响,因而需要用到直流和交流磁场综合磁化方式,即先用直流励磁器将被测构件磁化到近饱和区域,此时材料的磁导率变化成缓慢下降的直线,再在直流磁场上叠加一交变磁化场激发,从而获得线性度较好的输出信号。通常称此时的直流磁场为偏磁场,它的主要作用是减小磁导率变化和材料局部不均匀的影响,这种磁化方式在钢铁型材料的在线检测中得到广泛应用。

## 2 磁化强度选择

在磁性检测中,虽然检测目的不同,但磁化强度的选择首先以缺陷或结构特征产生的磁场能否被检测到为前提,一般要求以足够强的磁场进行励磁以获得磁敏感器件可以测量的磁场。另外,检测信号的信噪比和检测装置的经济性等也应成为考虑的因素。很明显,随着磁化强度的加强,磁化器的体积重量和成本将随之升高,因此,必须多方面综合考虑,择优选择磁化强度。

磁化应针对铁磁性材料的磁特性进行。图1为某一优质钢材的磁化特性曲线和磁导率随磁场强度

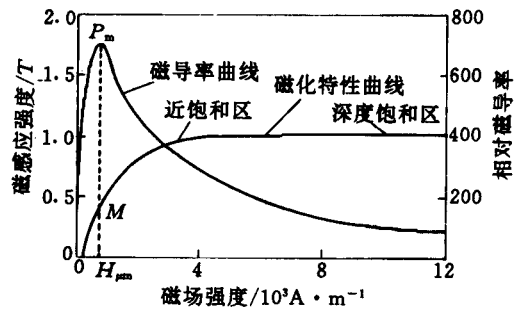


图1 铁磁性材料的典型磁化特性曲线

变化的曲线,图中 $P_m$ 为材料的最大磁导率点, $M$ 点在磁化曲线上,对应于 $P_m$ 点, $H_{\mu_m}$ 为磁导率取最大值时的磁场强度。一般来讲,相对磁导率随材料被磁化的强度呈非线性变化,远大于空气隙磁导率 $\mu_0$ 。

在剩余磁场检测方法中,为了获得最大的剩磁,磁化时的强度应选择在材料深度磁饱和处,在激励磁场退去后材料中的剩磁强度相对较大。

在MLF检测法中,当被磁化的铁磁性材料为连续体且表面光滑时(裂纹等尺寸远大于表面粗糙度),从有利于缺陷信号检测来看,材料中的磁化强度应大于 $H_{\mu_m}$ ,此时材料的磁导率处于 $P_m$ 点右侧。施加激励磁场后,在缺陷附近的局部区域中,通过该区域横截面(垂直于磁化场方向)上的磁通量几乎不变,因裂纹中的空气隙的磁导远小于材料磁导,一部分磁场将会绕过裂纹从其附近的材料中通过,致使它们中的磁场强度升高,磁导率下降,从而通过裂纹口空气隙外泄的漏磁通量相对增大。相反,当材料中的磁场强度小于 $H_{\mu_m}$ 时,材料的磁导率处于 $P_m$ 点左侧,随裂纹附近的材料中的磁场的增强,磁导率将增大,这样,裂纹口附近空气隙外泄的漏磁通量相对减小。当材料的磁化磁场强度大于 $H_{\mu_m}$ 后,裂纹等缺陷产生的漏磁场强度和磁通量将随着激励磁场强度的增大而增加,当磁化至近饱和区以后,磁感应强度的增加缓慢。

当被检测的铁磁性材料表面粗糙时(裂纹尺寸与粗糙度在同一数量级)或存在凸凹不平的结构形状时,粗糙不平的表面也将产生漏磁场,此时裂纹等缺陷漏磁场将叠加于这些背景漏磁场之上,因此,当激励磁场加强时,缺陷漏磁增加的同时,表面背景漏磁场也同样加强,漏磁检测信号中的缺陷检测信号的信噪比不一定得到提高。但是,当材料中的磁化强度处于 $P_m$ 点所对应的 $H_{\mu_m}$ 值附近时,裂纹产生的漏磁场畸变将达到最大,从而可获得相对于背景漏磁场的最大的变化磁场,也即在检测信号中得到最佳的信噪比。不过,当材料表面粗糙结构产生的漏磁

场变化具有规律性时,这一背景磁场信号可以采用适当的信号处理方法加以消除,这时,磁化强度根据光滑表面情况选择。表面不平产生的漏磁场信号往往为随机信号,在检测信号中为噪声,一般难以消除,因此,被测构件表面光滑时,可测量的最小裂纹尺寸会很小;而当表面粗糙时,对裂纹的测量能力和分辨力相对要低得多。

当缺陷在材料内部时,其产生的漏磁场将受到外围铁磁性材料的屏蔽,因而,扩散到材料表面的漏磁场将大大减弱。为减弱外层材料的磁屏蔽效应,需极大地减小外层材料的相对磁导率,最理想的情况是让其与空气磁导率接近,但一般情况下是不可能实现的。为了增强构件体表面上缺陷产生的扩散漏磁场的强度,一般需将材料深度饱和磁化。如图1所示,磁化在材料的最大磁导率处与深度磁饱和处时的相对磁导率之比约为7,因此,同一位置上相同尺寸的裂纹在两种磁化状态下泄漏至材料表面的漏磁场通量,深度饱和时至少是前者的7倍。事实上,由于材料中磁场强度的增加,外层铁磁材料磁导率下降,这一比值还要高一些。所以,对内部缺陷的检测,深度磁饱和非常重要。值得注意的是,当内部裂纹太小或埋藏深度太深,磁化场再强,在外表面也测不出漏磁场<sup>[6]</sup>,所以,内部缺陷检测的灵敏度比外部小得多。由于提高效应和屏蔽效应,漏磁场的测量点应尽可能靠近被测的缺陷,例如,检测钢管内壁上的裂纹等缺陷时,最优的方案应是从管内布置测量单元而不应选择在管外测量。

从磁场测量来看,铁磁性材料被磁化后,裂纹等缺陷将会产生扩散漏磁场,这一漏磁场强度随磁化强度、缺陷几何尺寸及位置变化<sup>[4]</sup>。当磁敏感元件的灵敏度不同时,其所能测得的最小磁场强度也不同,当采用高灵敏度元件时,磁化强度可以较弱;相反,元件的灵敏度较差时,要求的强度较强。磁化强度的增加以加大磁化器体积、重量和成本为代价,灵敏度的提高则增加元件成本。因此,磁化强度的选择应根据检测目的和检测装置要求,结合磁场测量方法和检测信号信噪比等要求综合考虑,以在体积、重量、性能及价格上求得最优。

在磁性检测中,检测装置的体积和重量主要集中于磁化器上,而这些又决定了检测装置的现场使用性能,因此,强度的选择应在确保检测灵敏度的同时以减轻磁化器的重量为主要目标<sup>[7]</sup>。

### 3 励磁磁路分析

在磁性检测中,磁化被测构件的方式有直接通

电流法、线圈法和磁轭法等,其中磁轭法用得最多。磁轭法励磁磁路主要由磁源、导磁连接体、气隙、被测构件等组成(图2)。在该磁路中,起决定性影响的结构尺寸有导磁连接体与被测构件间的气隙 $\delta$ 和两导磁连接体间的间距 $L_m$ 。磁路分析表明<sup>[8]</sup>, $\delta$ 决定了包括构件的主磁路中的磁阻大小,影响着磁源的工作点; $L_m$ 决定了两导磁连接体间的磁场分布特性<sup>[7]</sup>。

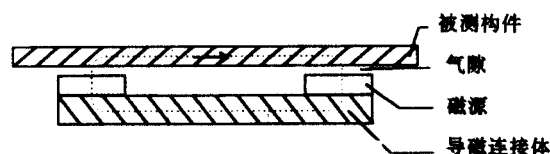


图2 励磁磁路结构

在磁性检测中,以被测构件内的磁感应强度为磁路计算和校核的指标。粗略的计算可采用磁导法<sup>[8]</sup>,较为精确的计算可采用有限元等方法<sup>[9]</sup>。磁导法通过求解磁路中各构件间的磁导,由磁路分析的基本理论求得构件的磁特性参数。图2所示磁路的磁导率分析模型如图3,磁路设计的优劣用磁源效率 $\lambda_m$ 来衡量, $\lambda_m$ 定义为进入被测构件中的磁通量与磁源磁通量之比,对应于图3所示的模型有

$$\lambda_m = \frac{\Phi_i}{\Phi_m} = \frac{G_a}{(G_a + 2G_L)}$$

式中  $G_a$ ——空气隙的磁导

$G_L$ ——漏磁导

为了提高 $\lambda_m$ ,可从三个方面着手:①增大 $G_a$ ,即减小 $\delta$ ,增大导磁连接体与被测构件间的接触面积。②减小 $G_L$ ,即增大 $L_m$ ,增加磁源磁化长度,减小磁源自身的漏磁,对于不同结构形状的被测构件,应适当选择磁化的磁路及其结构尺寸。③适当选择磁源在磁路中的位置和组合形式,图4为相同磁源在磁路中不同位置时,被测构件中的磁感应强度值。实验中稀土永久磁铁尺寸为20mm×20mm×10mm,其中10mm为磁化方向的尺寸、导磁连接体尺寸为140mm×20mm×20mm、构件尺寸为300mm×20

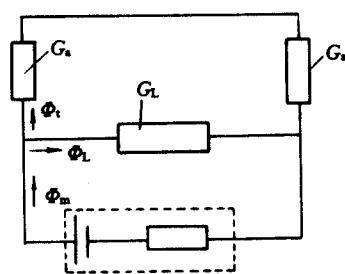


图3 磁导分析模型

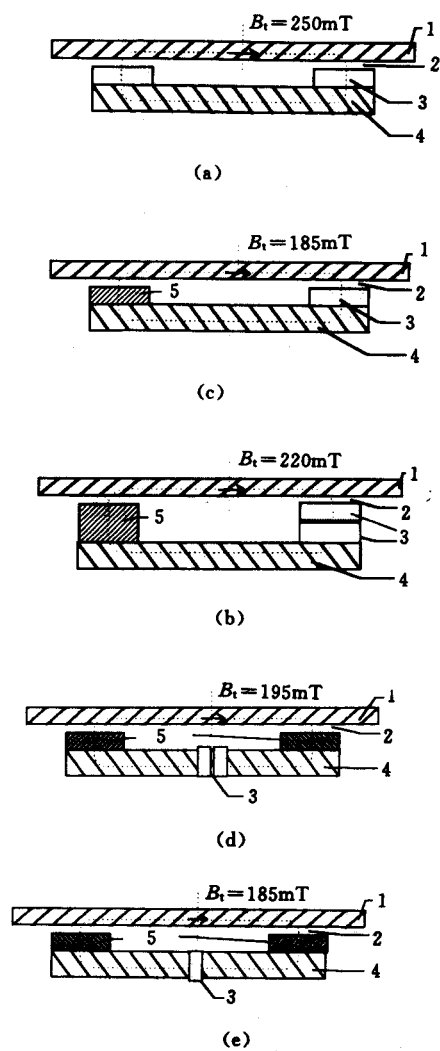


图4 不同磁源位置的磁感应强度值  
1. 被测构件 2. 气隙 3. 磁铁  
4. 导磁连接体 5. 铁块

mm×20mm,气隙为1mm。

#### 4 永磁励磁的磁化器结构

磁化器的结构随被测构件的几何形状变化,并与磁化方向和漏磁测量装置相关,典型的结构如图5所示。图5a为钢绳芯皮带内钢绳断裂、磨损及锈

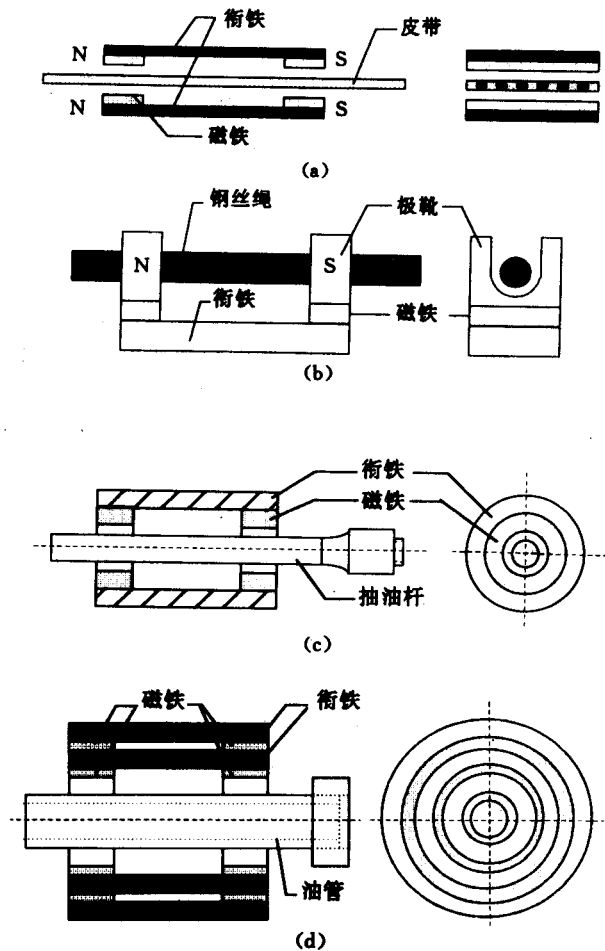


图5 永磁励磁的磁化器结构

蚀检测用磁化器结构;图5b为钢丝绳断丝检测用磁化器结构;图5c为抽油杆横向裂纹检测用磁化器结构;图5d为油管壁厚检测用磁化器结构。磁化器结构设计中,可选择圆柱形、长方形、圆筒形及瓦形永久磁铁与不同的被测结构相配合。

#### 参 考 文 献

- 1 宋后定,陈培林. 永磁材料及其应用. 北京:机械工业出版社,1984.
- 2 杨叔子,康宜华. 钢丝绳断丝定量检测原理与技术. 北京:国防工业出版社,1995. (下转第225页)



### 《美国无损检测手册》中译本系列丛书出版

1993年由世界图书出版公司出版的首卷《美国无损检测手册·射线卷》中译本受到了广大探伤工作者的热烈欢迎。在广大探伤专家和检测人员的关爱下,相应的磁粉卷、渗透卷及超声卷也相继问世,并且涡流卷不久也将出版,至此《美国无损检测手册》中常规探伤方法的中译本已出齐。

《手册》中译本系列丛书现由上海材料研究所发行处发行,需购者请与他们联系。

联系地址:上海市邯郸路99号 上海材料研究所资料发行处(上海材料研究所内),邮编:200437,联系人:单国英,联系电话:(021)65420775×311。

上海材料研究所资料发行处



# 长颈法兰与壳体连接焊缝射线探伤范围的确定

李忠

牛朋斋

(济南市锅炉压力容器检验研究所, 济南 250033) (济南市压力容器厂, 济南 250022)

## DETERMINATION OF RADIOGRAPHIC INSPECTION RANGE OF THE WELDS BETWEEN LONG-NECK FLANGES AND SHELLS

Li Zhong

Niu Pengzhai

(Jinan Boiler and Pressure Vessel Inspection Institute) (Jinan Pressure Vessel Plant)

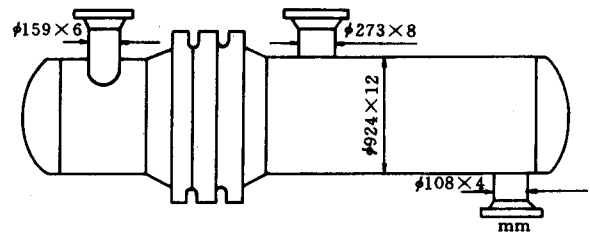
### 1 B类焊缝探伤范围的有关规定

长颈法兰与接管的连接焊缝以及长颈法兰与壳体的连接焊缝均属于B类焊缝,这在GB 150-89《钢制压力容器》的图10-1及其2号修改单中已明确规定。对公称直径 $\leq 250\text{mm}$ 的接管与长颈法兰连接的B类焊缝进行射线探伤时,探测范围应为百分之百,这在标准修改单中也明确指出。而连接壳体与长颈法兰的B类焊缝,其射线探伤范围在《钢制压力容器》和《压力容器安全技术监察规程》中均没有规定,因此设计人员在确定此类焊缝射线探伤范围时,就有了很大的随意性,也带来了很大的危险性。

以我厂生产的属II类压力容器的燃油加热器(附图)为例,设备法兰均为长颈法兰。图样的技术要求规定,设备的A、B类焊缝均进行射线探伤,探伤长度不少于各条焊缝长度的20%,且 $\leq 250\text{mm}$ 。

### 2 分析及结论

燃油加热器设备采用长颈对接法兰,是因为长颈对接法兰的承载能力比甲型和乙型法兰都高,这在JB 4700-4707-92《压力容器法兰》标准中都已说明,对长颈法兰与壳体和管箱连接的焊缝质量也



附图

应更加严格要求。

而标准要求公称直径 $\geq 250\text{mm}$ 接管与长颈法兰的对接焊缝应进行百分之百的射线探伤。附图中 $\phi 273\text{mm} \times 8\text{mm}$ 管口的长颈法兰与接管对接焊缝和长颈法兰与壳体和管箱连接的焊缝受力方向是一致的。若两者施加载荷均为5MPa,380℃,焊缝损坏程度大的应是长颈法兰与壳体及管箱连接的焊缝。

因此笔者认为,当对类似附图压力容器的A和B类焊缝作局部射线探伤时,长颈法兰与壳体及管箱连接的B类焊缝应与公称直径 $\geq 250\text{mm}$ 接管与长颈法兰的对接焊缝一样,探伤范围应为百分之百,而不是20%。

收稿日期:1998-03-12

(上接第209页)

- 3 王会宗等. 磁性材料及其应用. 北京:国防工业出版社, 1989.
- 4 Forster F. NDT International, 1986,19(1):3-14
- 5 王肇和. 电测与仪表,1993,(8):43-46
- 6 Zhang Yaobang et al. NDT & E International, 1995,28(2):67-71

- 7 康宜华等. 中国机械工程,1993(增刊):82-84
- 8 易敬曾. 磁场计算与磁路设计. 四川:成都电讯工程学院出版社,1987.
- 9 周克定等. 工程电磁场数值计算的理论与应用. 北京:高等教育出版社,1994.

收稿日期:1998-01-10