



第六章 涡流检测技术

6.1 涡流检测基础知识

6.2 涡流检测原理

6.3 涡流检测仪器及设备

6.4 涡流检测方法

6.5 涡流检测技术应用



6.1 与涡流检测相关的电学和磁学基本知识

- 6.1.1 金属的导电性
- 6.1. 2 金属的磁特性
- 6.1. 3 电磁感应

6.1.1 材料的导电性

- 材料的导电率
- 根据欧姆定律，沿一段导体流动的电流强度与其两端的电位差成正比。

$$I = U/R \quad R = \rho \frac{L}{S}$$

根据一定材料的导体，它的电阻与导体长度(L)成正比，与导体的截面积(S)成反比， ρ 为导体的电阻率单位为：
($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)或($\mu \cdot \Omega \cdot \text{cm}$)

- 电导率（导电率）： σ 为电阻率 ρ 的倒数， $\sigma=1/\rho$
 σ 是用来描述物质中电荷流动难易程度的参数，单位是西门子/米（简写做S/m）。



影响电导率的因素

1. 杂质含量

如果在导体中掺入杂质，杂质会影响原子的排列，引起电阻率的增加，电导率下降。

2. 温度

随着导体的温度升高，导体内的原子热振动加剧，自由电子的碰撞机会增加，电阻率随之增加，金属的电导率随着温度的升高而减小。

半导体的电导率随着温度的升高而增加。

3. 冷热加工

材料的冷热加工，可能产生内应力而使原子排列结构变形，电子受到碰撞次数增加，电阻率也会上升，电导率下降。

4. 合金成份

对于固溶合金(杂质在基体金属内均匀分布)，一般说来电阻率随着合金成份的增加而增加，电导率下降。

6.1.2 金属的磁特性

■ 磁化：

- 物质在外磁场作用下感生出磁场的物理过程称为磁化。

■ 顺磁质：

- 感生磁场微弱、与外磁场方向相同的物质，如铝。

■ 逆磁质：

- 感生磁场微弱、与外磁场方向相反的物质，如铜。

■ 铁磁质：

- 感生磁场强的物质，如铁，钴、镍及其合金。

■ 磁导率：

$$\mu = \frac{B}{H}$$

相对磁导率：

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

- B: 磁感应强度， H: 磁场强度， μ : 介质的磁导率， μ_0 : 真空磁导率

- 顺磁质 ($\mu_r > 1$)， 抗磁质 ($\mu_r < 1$)， 铁磁质 ($\mu_r \gg 1$)。



影响磁导率的因素

1. 化学成份和热处理状态

材料的化学成份和热处理状态不同，表现的磁导率也不同。如不同含碳量的碳钢，在退火状态比淬火材料磁导率要高，而随着含碳量的提高，相对磁导率也会降低。

2. 冷加工

如300系列不锈钢非磁性的奥氏体钢经冷却加工后形成马氏体相，就会增加磁导率。相反，大多数铁磁材料的导磁率会减小。

3. 温度

各种磁性材料的居里点：铁(769°C)、钴($1118\sim 1124^{\circ}\text{C}$)、镍($353\sim 358^{\circ}\text{C}$)、钇(16°C)、渗碳体 Fe_2C (215°C)、硫化铁 FeS (320°C)、四氧化三铁 Fe_3O_4 (575°C)、三氧化二铁 Fe_2O_3 (620°C)、软磁铁氧体($50\sim 600^{\circ}\text{C}$)

6.1.3 电磁感应

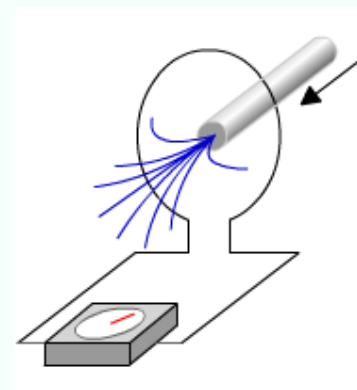
1. 电磁感应：

- 当穿过闭合导电回路所包围面积的磁通量发生变化时，回路中将产生电流的现象。
- 法拉第感应定律

感应电动势

$$E_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad E_i = - N \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(N\Phi)}{dt}$$

$d\Phi/dt$ —是磁通随时间的变化量， n ---线圈匝数



2. 自感应：

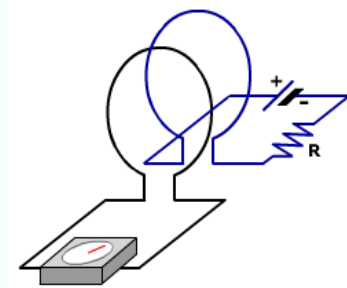
当线圈中通有交变电流时，线圈中将产生感应电动势的现象。

$$E_L = - L \frac{dI}{dt}$$

L ：自感系数，它与回路的几何形状、大小、匝数及回路中的介质有关、

- ### 3. 互感应：
- 如果有两个螺线管线圈的闭合回路靠在一起，当第一个通上电流 I_1 ，在第二个回路中就会产生感生电流。

$$E_{21} = - M \frac{dI_1}{dt}, E_{12} = - M \frac{dI_2}{dt}$$



6.2.1 涡流检测的发展过程

- 1879年，英国人休斯利用感生涡流对不同的合金进行了判断实验，材质分选。
- 20世纪50年代初，德国的福斯特等人提出阻抗平面图分析法和相似定律。
- 涡流仪器的发展经历了三代。
 - 第一代模拟类机器
 - 第二代数字式仪器
 - 第三代智能仪器
- 当前涡流检测技术的研究方向：
 - 1. 多频涡流检测技术
 - 2. 远场涡流技术：低频
 - 3. 深层涡流技术：低频涡流和多频涡流技术的综合
 - 4. 磁光涡流成像技术

6.2.2 涡流检测基本原理

■ 涡流检测

- 利用电磁感应原理，通过测定被检工件内感生涡流的变化来无损评定导电材料及其工件的某些性能，或发现缺陷的无损检测方法称为涡流检测。

■ 涡流

- 当检测线圈中通有交变电流时，在线圈周围产生交变磁场；当此交变磁场相对导体作运动时，导体中会感生出涡状流动的电流。

■ 原理

- 涡流伴生的感应磁场与原磁场叠加，使检测线圈的复阻抗发生变化。
- 导体内感生涡流的幅值、相位、流动形式及其伴生磁场受导体的物理特性影响，进而影响检测线圈的复阻抗。
- 因此通过监测检测线圈的阻抗变化即可非破坏地评价导体的物理和工艺性能。

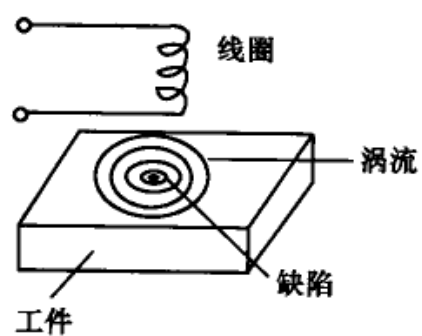
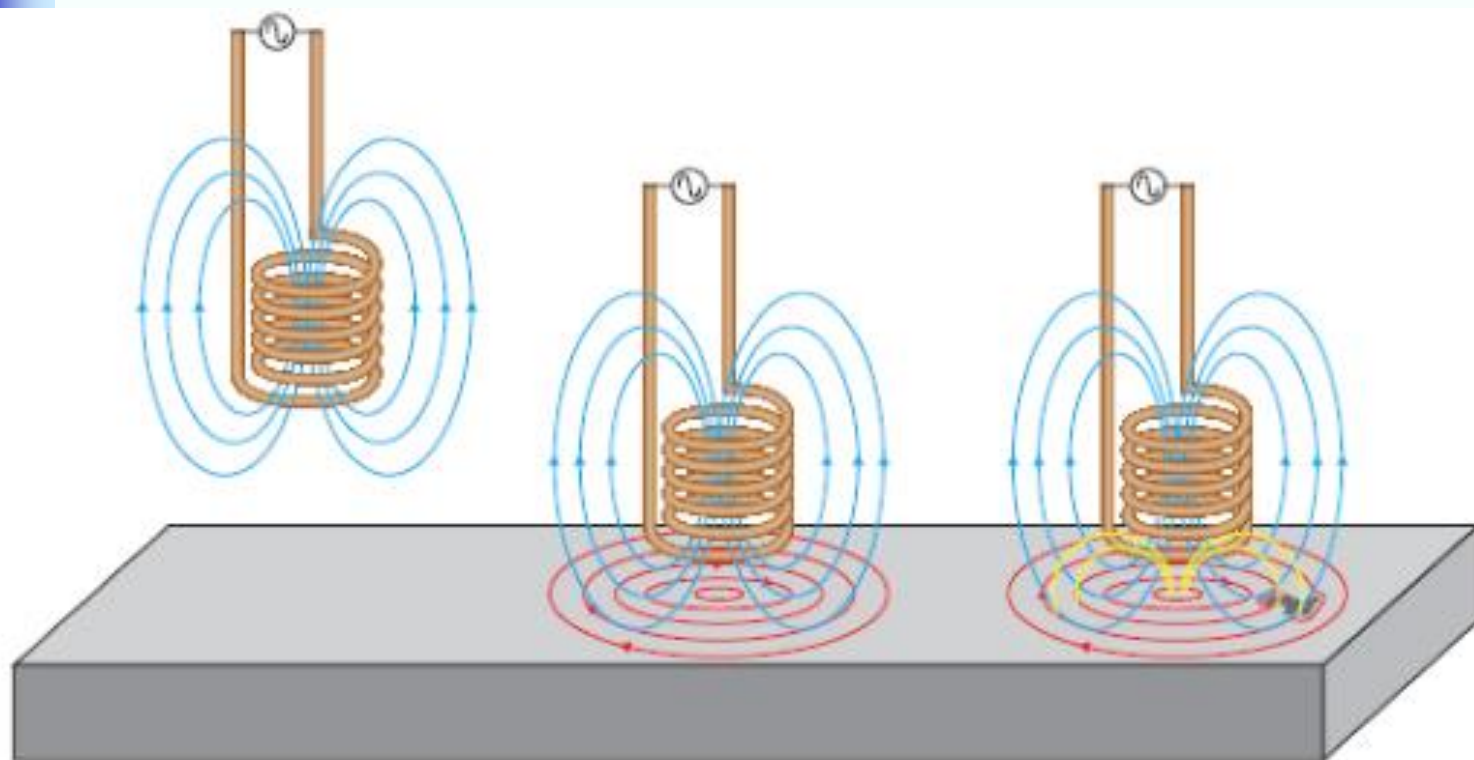


图 3-1 涡流检测示意图

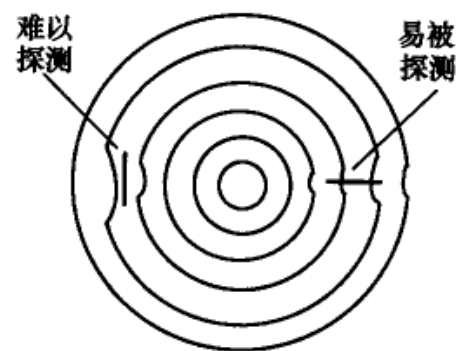


图 3-2 裂纹垂直于涡流流向易被检测



6.2.3 涡流检测的特点

- 表面或近表面缺陷检测
- 只适用于导电材料
- 非接触，无需耦合
- 检测速度快，易于实现自动化
- 适用于高温检测
- 适用于异型材料和小零件检测

6.2.4 涡流检测的主要用途以及影响感生涡流特性的主要因素

检测目的	影响涡流特性的主要因素	用 途
探伤	缺陷形状、尺寸和位置	导电的管、棒、线材及零部件的缺陷检测
材质分选	电导率	混料分选和非磁性材料电导率的测定
测厚	检测距离和薄板厚度	涂覆层及薄板厚度的测量
尺寸检测	工件的尺寸和形状	工件尺寸和形状的控制
物理量测量	工件与检测线圈间的距离	径向振幅、轴向位移及运动轨迹的测量

6.2.5 趋肤效应和渗透深度

- 电流 I 流过导体，在 I 的垂直平面形成交变磁场，交变磁场在导体内部产生感应电动势，感应电动势在导体内部形成涡流电流 i ，涡流 i 的方向在导体内部总与电流 I 的变化趋势相反，阻碍 I 变化，涡流 i 的方向在导体表面总与 I 的变化趋势相同，加强 I 变化。
- 在导体内部，等效电阻变大，而导体表面的等效电阻变小，交变电流趋于在导体表面流动，形成趋肤效应。

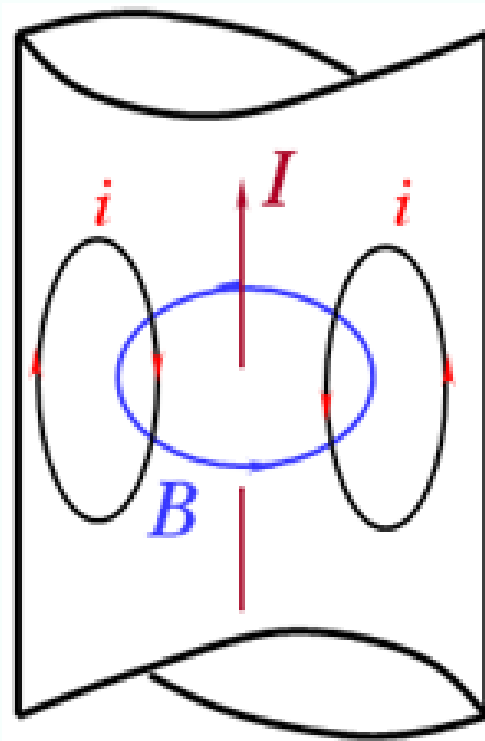


图2、涡流与趋肤效应

感应电动势与磁感应的磁通量的变化速度成正比，所以磁场变化愈快，即交流电流的频率愈高，所产生的涡流愈大。



6.2.5趋肤效应和渗透深度

- 趋肤效应：
 - 涡流集中在靠近激励线圈的材料表面附近
 - 交变电流激励磁场强度及涡流密度，随着深度增加按指数分布规律递减；
 - 涡流的相位差随着深度增加成比例的增加。

6.2.5趋肤效应和渗透深度

- 透入深度：涡流透入导体的距离。涡流密度衰减到表面值的 $1/e$ 时的透入深度成为**标准透入深度**，用符号 δ 表示。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

σ 为材料电导率，单位是S/m

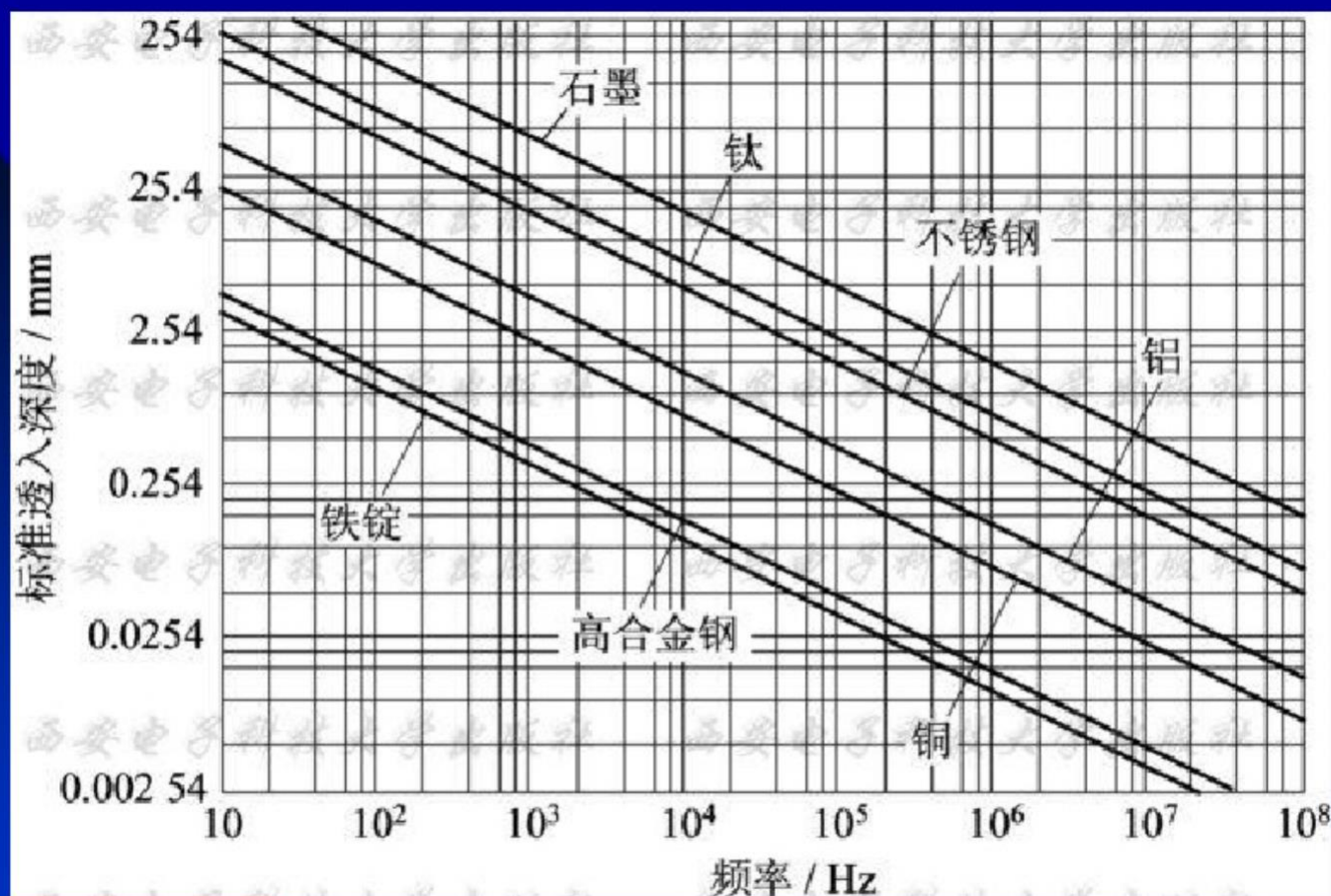
f 为交流电流频率，单位是Hz

μ 为材料的磁导率，单位是H/m

用相对磁导率表示：

$$\delta = 503 / \sqrt{f \mu_r \sigma}$$

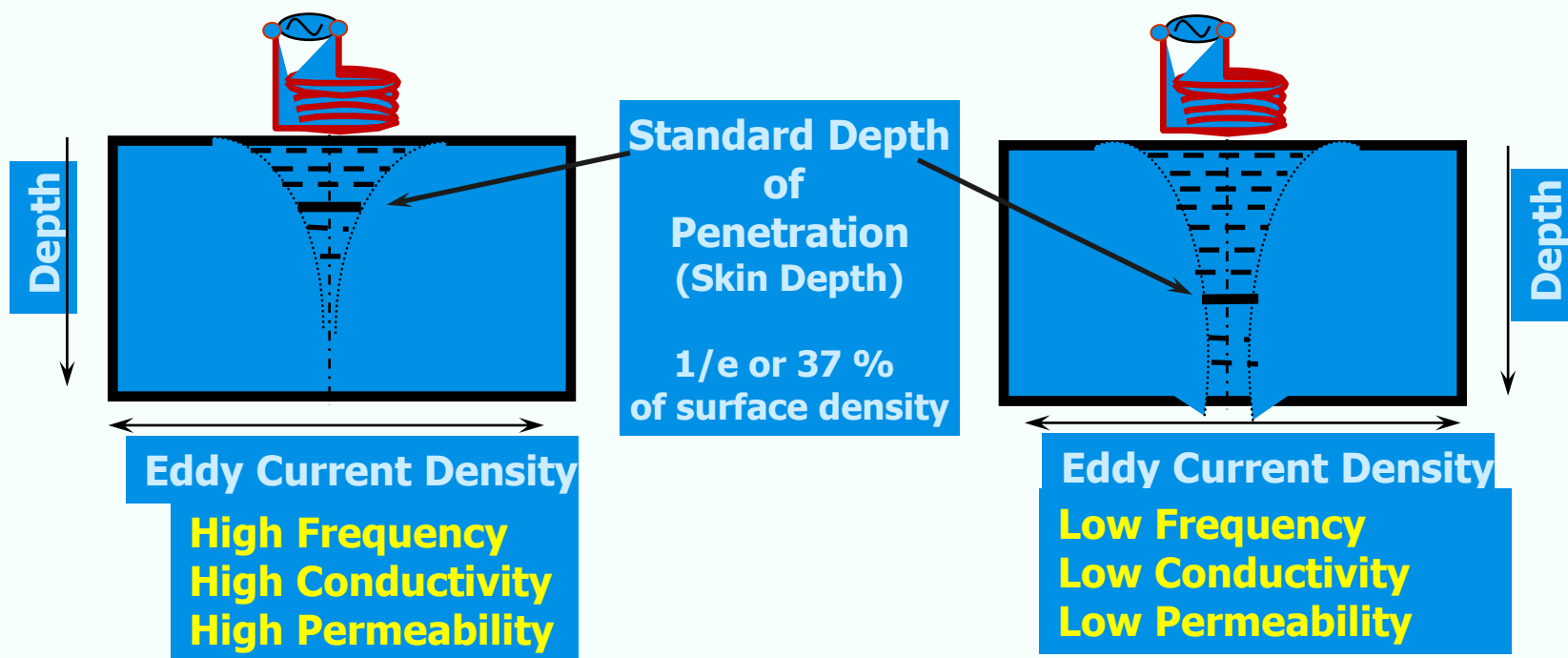
真空磁导率： $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$



几种不同材料的标准透入深度与频率的关系

6.2.5 趋肤效应和渗透深度

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$



实际应用中，将 δ 的透入深度定义为涡流的有效透入深度（**占90%的涡流总量**），对涡流检测线圈产生有效影响。如果缺陷在有效透入深度之外，则会导致检测困难。



6.2.6 涡流检测线圈的阻抗分析

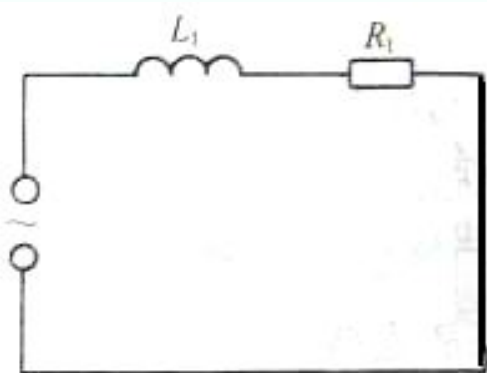
- 1. 单线圈的阻抗
- 2. 耦合线圈的阻抗
- 3. 阻抗平面图

6.2.6 涡流检测线圈的阻抗分析

■ 线圈阻抗分析：

- 理想线圈只有感抗，而实际线圈都有内阻，其阻抗可表示为 $Z = R + jX = R + j\omega L$ ，R：电阻，X：感抗， ω ：角频率，L：线圈电感

■ 单个线圈的等效电路如下图所示



电感：当线圈中有电流通过时，在线圈中形成感应电磁场，而感应电磁场又会在**线圈中产生感应电流来抵制通过线圈中的电流**。电流与线圈之间的相互作用称其为电的**感抗**，也就是**电感**。

阻抗：在具有**电阻、电感和电容**的电路里，对电路中的电流所起的阻碍作用。



6.2.6 涡流检测线圈的阻抗分析

线圈耦合等效电路:

- 当初级线圈（检测线圈）与次级线圈（被检对象）相互耦合时，由于互感的作用，闭合的次级线圈中会产生感应电流，而这个电流反过来又会影响初级线圈中的电压和电流。这种影响可以用次级线圈电路的阻抗，通过互感 M 反映到初级线圈电路的折合阻抗来体现。

6.2.6 涡流检测线圈的阻抗分析

■ 线圈耦合等效电路:

- 两个相互耦合的线圈如下图所示。将二次线圈电路阻抗通过互感转换为一次线圈电路的折合阻抗，如图C所示。

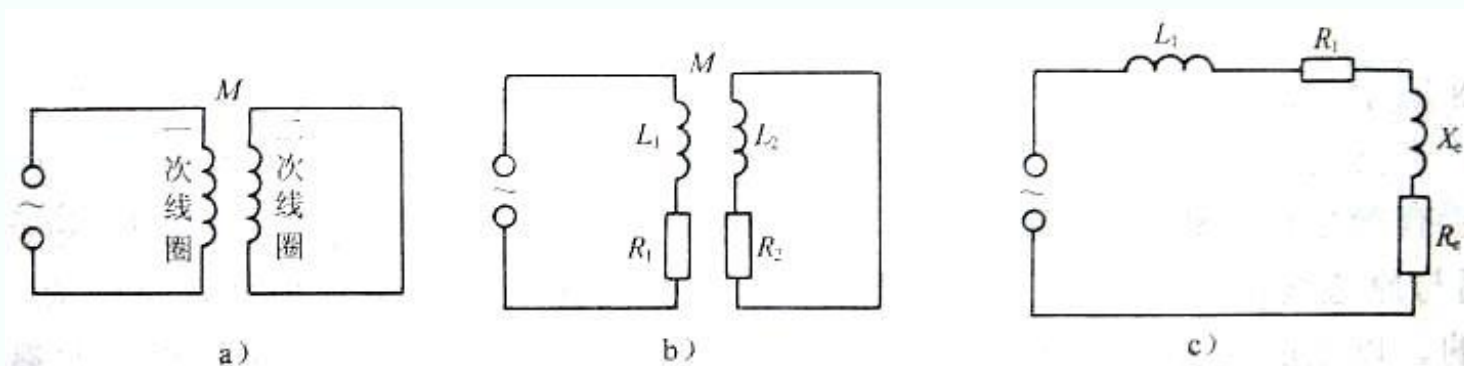


图2-6 线圈耦合的等效电路

a) 线圈耦合电路 b) 等效电路 c) 二次线圈折合到一次线圈的等效电路

$$I_1 = \frac{\vec{E}}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 + j[\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2]}$$

6.2.6 涡流检测线圈的阻抗分析

- 折合阻抗的计算:

$$Z_e = R_e + jX_e \quad R_e = \frac{X_M^2}{R_2^2 + X_2^2} R_2 \quad X_e = -\frac{X_M^2}{R_2^2 + X_2^2} X_2$$

R_2 : 副边线圈的电阻

X_2 : 副边线圈的电抗, $X_2 = \omega L_2$

X_M : 互感抗, $X_M = \omega M$

R_e : 折合电阻

X_e : 折合电抗

感应出涡流的导体可以按二次线圈来分析

6.2.6 涡流检测线圈的阻抗分析

视在阻抗的计算

- 将次级线圈的折合阻抗与初级线圈自身的阻抗的和称为初级线圈的视在阻抗 Z_s

$$Z_s = R_s + jX_s = R_1 + R_e + j(X_1 + X_e)$$

- 式中： R_s 为视在电阻， X_s 为视在感抗。
- 应用视在阻抗的概念，就可以认为初级线圈电路中电流和电压的变化是由于它的视在阻抗的变化引起的，而据此就可以得知次级线圈对初级线圈的效应，从而可以推知次级线圈电路中阻抗的变化。

6.2.6 涡流检测线圈的阻抗分析

- 半圆形曲线在阻抗平面图上的位置与初级线圈自身的阻抗以及两个线圈自身的电感和互感有关。
- 半圆的半径与位置与初始线圈自身阻抗、频率不同、两线圈间耦合系数不同等而发生变化。
- 为了消除初级线圈阻抗以及激励频率对曲线位置的影响，便于比较，通常对阻抗进行归一化处理。
- 如果二次线圈的电阻 R_2 从 ∞ 递减到0，或者 X_2 由0逐渐增加到 ∞ ，计算出一系列对应的 $R_s - X_s$ ，可得阻抗平面图如右图所示。

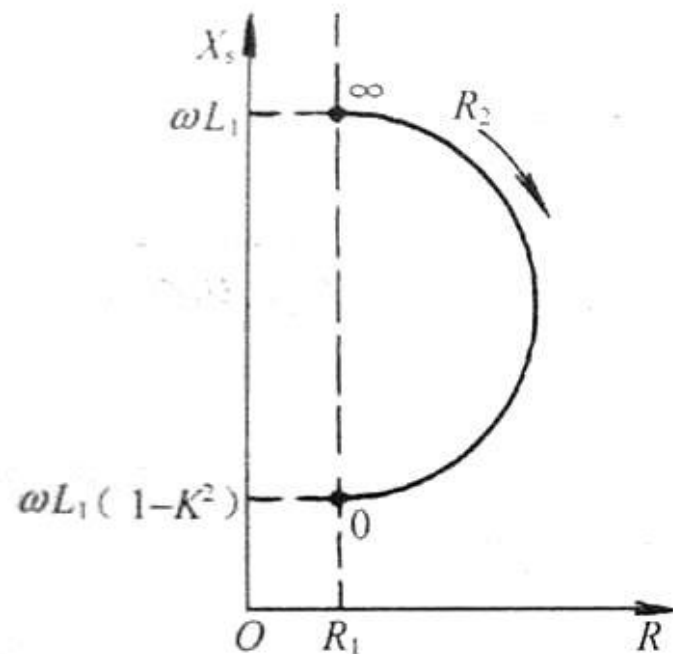


图2-7 线圈耦合时原边线圈的视在阻抗平面图

归一化后的阻抗平面图

阻抗平面图原点坐标向右平移 R_1 距离，然后再用 ωL_1 去除 X_s 和 R_s 坐标，使 Z_s 的半圆轨迹的直径在 X_s 上，轨迹上诸点的位置则取决于参变量 L_2/R_2 的实际取值。

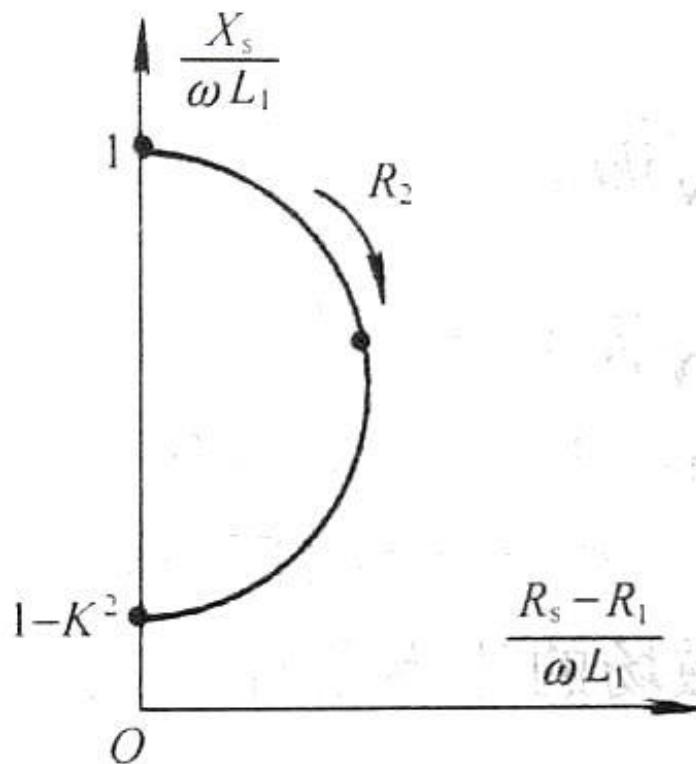


图2-8 归一化后的阻抗平面图



阻抗平面图是表示试验线圈阻抗变化点的平面轨迹图形。

6.2.7影响线圈阻抗的因素

■ 影响阻抗变化的主要因素：

- 提离效应的影响
- 边沿效应的影响
- 工件电导率 σ 的影响
- 磁导率 μ 的影响
- 实验频率的影响
- 工件厚度的影响
- 线圈直径的影响

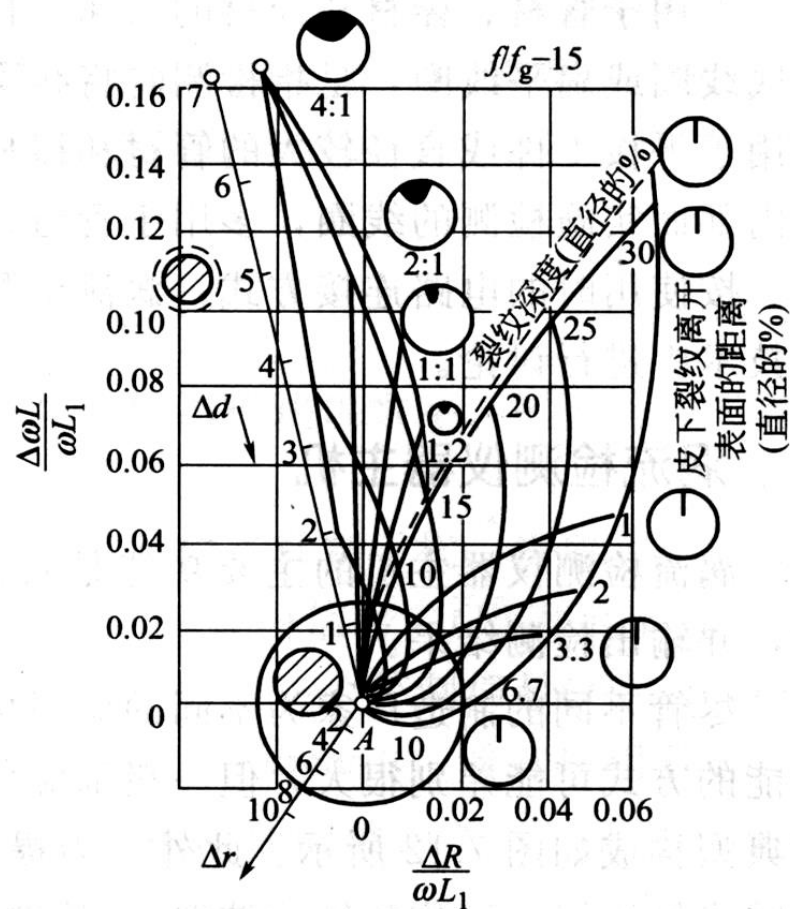


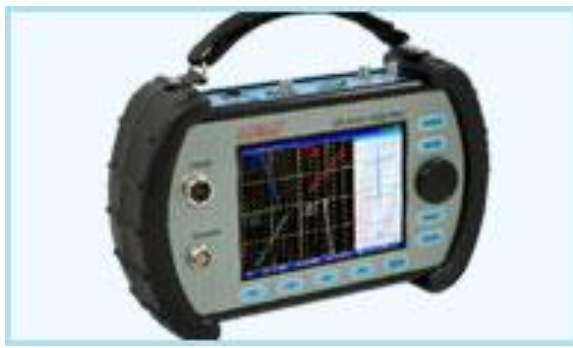
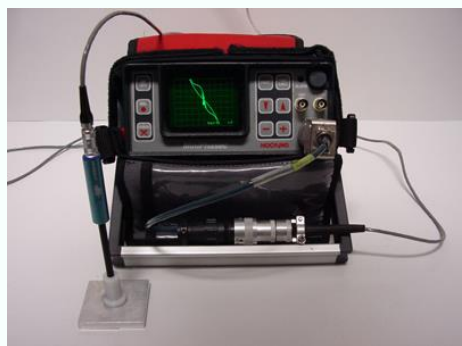
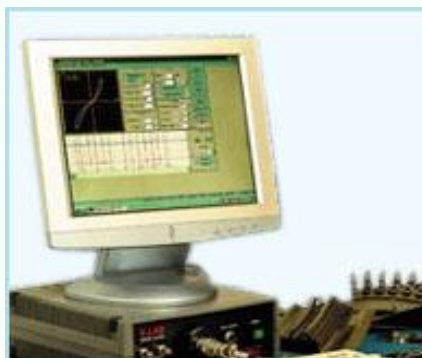
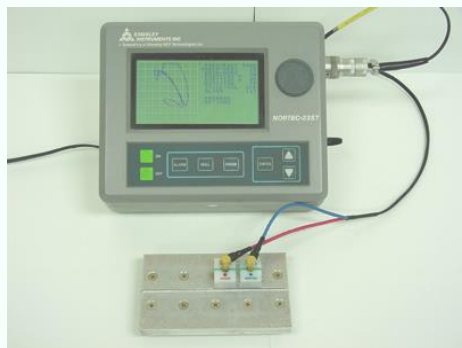
图 7-10 非磁性导电圆柱体上的
裂纹对线圈阻抗的影响



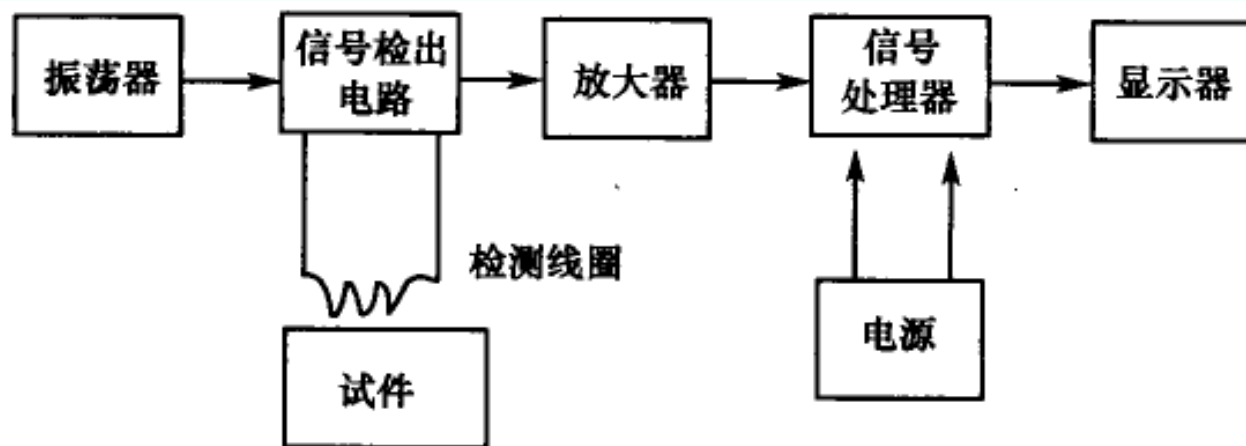
6.3 涡流检测仪器及设备

- 6.3.1 涡流检测仪
- 6.3.2 涡流检测探头(检测线圈)
- 6.3.3 对比试样

6.3 涡流检测仪器及设备



6.3.1 涡流检测仪



■ 功能:

- ①产生激励信号;
- ②检测涡流信息;
- ③鉴别影响因素;
- ④指示检测结果。

■ 组成 (基本电路)

- 振荡器
- 信号检出电路
- 放大器
- 信号处理电路
- 显示器和电源电路

6.3.1 涡流检测仪

■ 1 振荡器

- 高频振荡频率为2MHz—6MHz，适合于检测表面裂纹；
- 低频振荡频率为50kHz~100kHz，穿透深度较大，适合于检测表面下缺陷和多层结构中第二层材质中的缺陷。

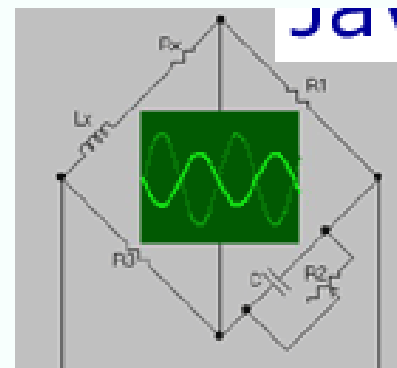
■ 2 放大器

- 要求：低噪声、宽动态范围和低失真

■ 3 抑止电路：通过信号叠加和平均消除干扰

■ 4 检出电路：幅度探测器、相位探测器

■ 5 显示：电流表显示、阻抗图显示、计算机数字处理和显示





6.3.2 涡流检测探头(检测线圈)

- 3.3.2.1 检测线圈的分类
- 3.3.2.2 检测线圈的使用方式



检测线圈（俗称探头）

- 检测线圈的功能

激励功能：建立一个能在试件中感生出涡流的交变磁场；

测量功能：测量出带有试件质量信息的涡流磁场及其变化。

- 检测线圈的组成

激励绕组和测量绕组。

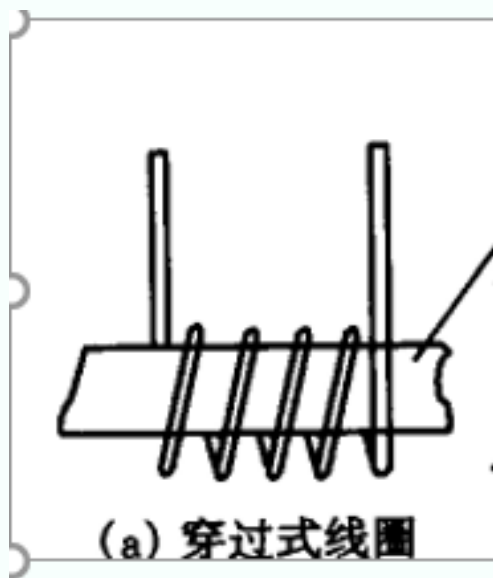
激励绕组实现检测线圈的机理功能，测量绕组实现检测线圈的测量功能。激励绕组和测量绕组可以是分立的两个绕组，也可以是同一个绕组。

检测线圈的分类和特点

(1) 按应用方式分类

1. 穿过式线圈：能使试件在其中放入或穿过的线圈

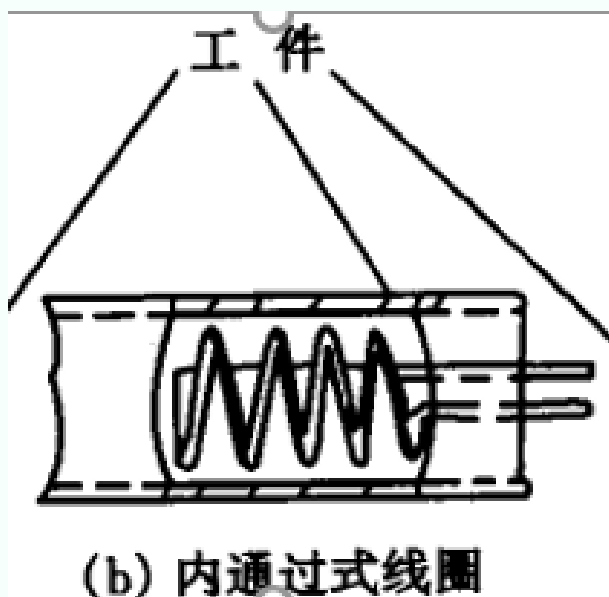
特点：穿过式线圈适于检测能从线圈中通过的棒材、管材、丝材和各种球体等，可一次检测试件的整个圆周并连续进行，检测速度快，容易实现自动化探伤，特别适用于大批量冶金产品的检查。



检测线圈的分类和特点

2. 内插式线圈：

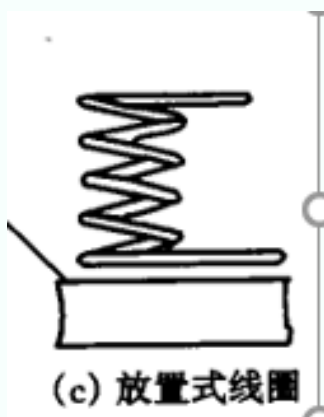
特点：内插式线圈适于厚壁管和钻孔等的内壁探伤以及在役设备中管道的检测。可一次检测试件的整个圆周，检测效率高。使用内插式线圈不易实现自动化检测。



检测线圈的分类和特点

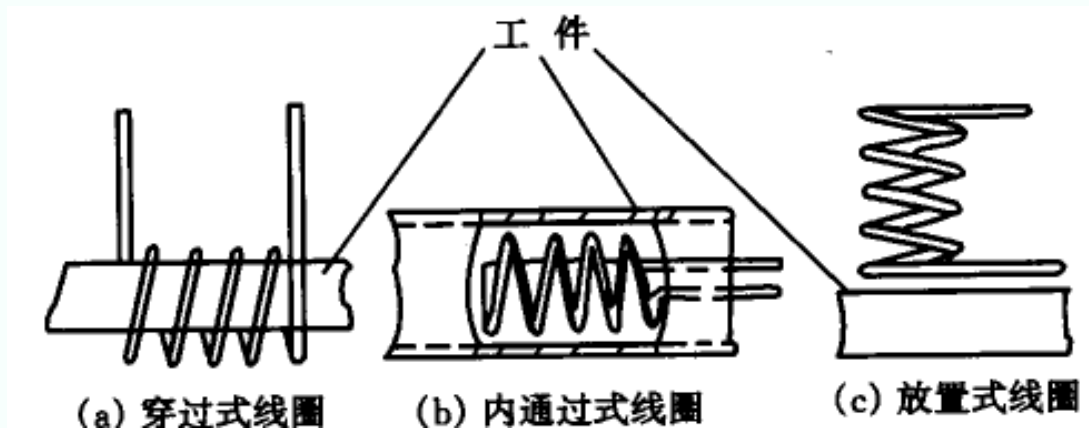
3.探头式线圈：放置于试件表面的**点式线圈**，也称探头或放置式线圈。

特点：探头式线圈较多地用于平面试件的扫描探伤和管、棒材的旋转扫描探伤，还能用于**复杂形状零件的局部检测**。探头式线圈常常绕制在各种形状的磁芯上，以增强检测区域的磁场强度。探头式线圈的体积一般较小，所以检测区域较小，但检测灵敏度高。



小结

- 1 **穿过式线圈**：小直径管材、棒材、线材等检测
 - 2 **内通过式线圈**：管件、深孔、螺纹孔内壁表面检测。
 - 3 **放置式线圈**：板材、带材和大直径管材、棒材的表面检测，
形状复杂的工件的特定区域局部检测。
- 穿过式和内插式线圈的检测效率高于探头式线圈。
 - 穿过式和内插式线圈对于缺陷取向较为敏感；探头式线圈受裂纹取向的影响小。



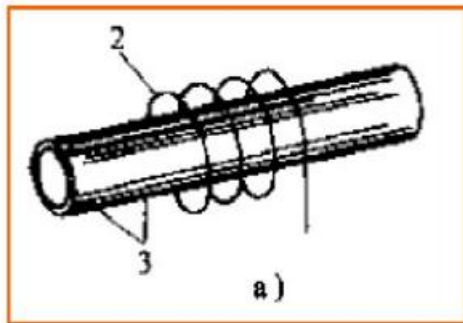
检测线圈的分类和特点

(2) 按比较方式分类

1. **绝对式线圈**：测量绕组只是采用**一个绕组**进行工作的检测线圈。

特点：绝对式线圈**直接测量线圈阻抗的变化**。试件的各种因素（如材质、形状、尺寸和缺陷等）对绝对式线圈都有影响。**检测灵敏度较低，只能探测大的焊缝**。绝对式线圈更多的是利用**提离效应来测量涂层厚度和测量间距大小等**。

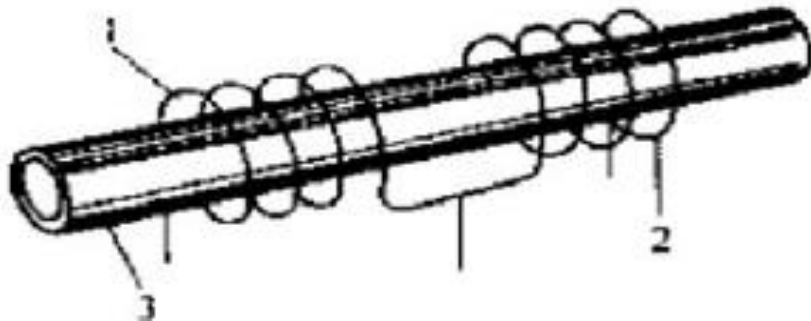
穿过式、内插式线圈和探头式线圈都可以按绝对式连接。



检测线圈的分类和特点

2. **自比式线圈**：测量绕组是采用二个相距很近的相同绕组进行工作的检测线圈。

特点：二个绕组对同一个试件的不同部位进行检测，当试件性能稳定且无缺陷时，两个绕组的合成感应电压为零；**当出现缺陷致使两个绕组感应电压出现差异时，给出一个差值电压信号**。自比式线圈可抑制试件尺寸和电导率等变化缓慢的信号，对提离间隙变化、工件传输时的抖动以及周围环境温度的敏感性也较低，而对突然变化的缺陷信号具有明显反应。



1. 参考线圈

2. 检测线圈

3. 管材



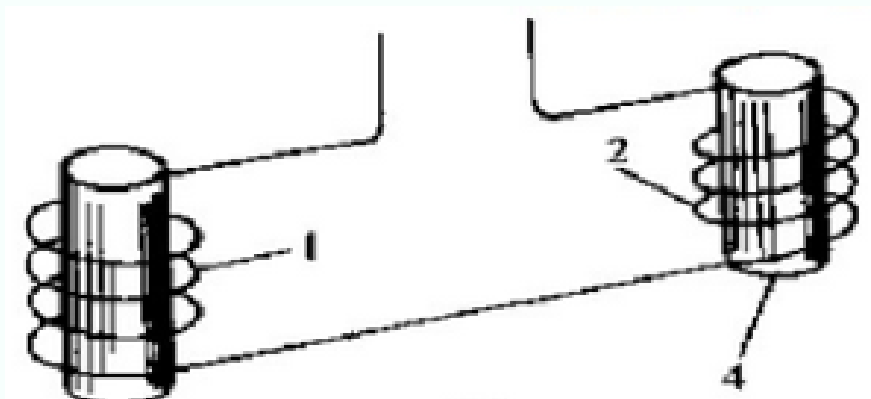
检测线圈的分类和特点

- 自比式线圈对沿管棒材轴线方向上的长缺陷，只在缺陷的两个端部才产生信号，而在缺陷的中央部位由于两个测量绕组都处于有缺陷部位上，信号被抵消，因此对工件上一根从头到尾的长裂纹用自比式线圈无法探测出。自比式检测线圈按测量绕组的连接方式有差动式和桥式之分。

检测线圈的分类和特点

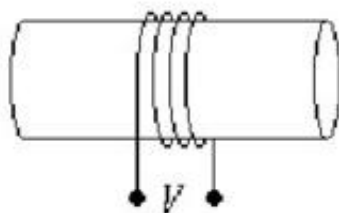
3. 他比式线圈（标准比较式）：测量绕组采用两个相同的绕组进行工作，一个放在被测试件上，另一个放在对比（标准）试样上的检测线圈。

特点：他比式线圈的检出信号是两个试样存在的差异，当被测试件性能与标准试样不同时或被测试件有缺陷时，两个线圈给出一个差值电压信号。与绝对式线圈相同，他比式线圈会受工件材质、形状和尺寸变化的影响。但对管棒材轴线方向从头到尾深度和宽度相等的裂纹能够检测出来。

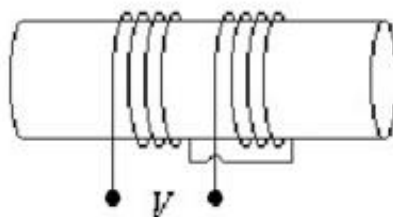


小结

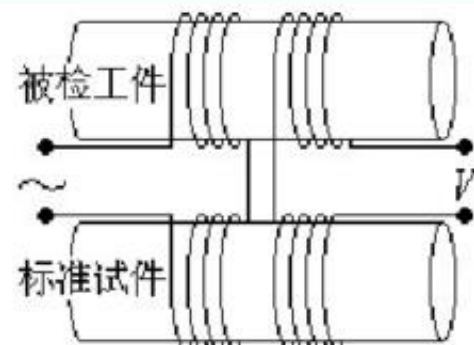
- 绝对式线圈对被检测对象情况产生响应，如材质、形状、尺寸等，受环境条件影响明显，如温度变化和外界电磁场干扰等。
- 自比式线圈能抑制由于环境温度、工件外形尺寸等缓慢变化引起的线圈阻抗的变化。
- 他比式线圈具有发现外形尺寸、化学成分缓慢变化的特点。



(a)



(b)



(c)

按比较方式分类

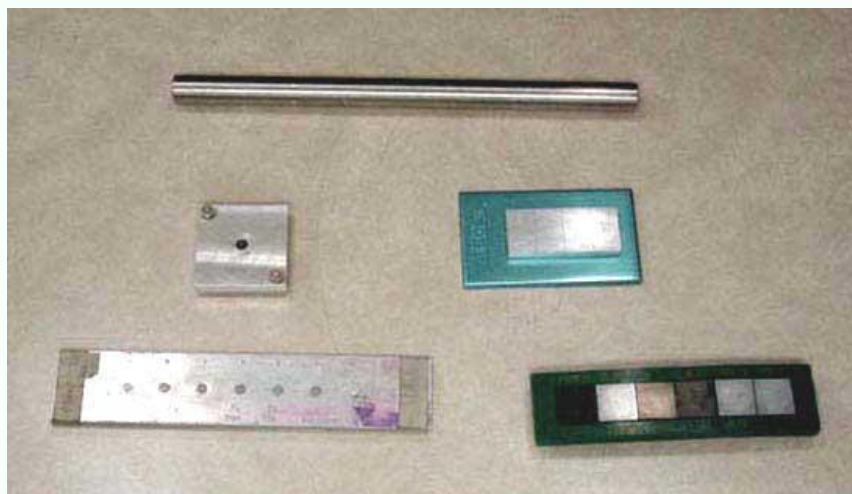
(a) 绝对式线圈

(b) 自比式线圈

(c) 他比式线圈

6.3.3 对比试样

- 检测和鉴定涡流检测仪的灵敏度、分辨力、端部不可检测长度等性能，用于：
 - 选择检测条件
 - 调整检测仪器
 - 定期检查仪器
 - 作为整个仪器的标准当量



6.4 涡流检测方法

一、涡流检测一般步骤

1、检测前的准备

根据试件的性质、形状、尺寸及欲检出缺陷种类和大小选择检测方法及设备。对小直径、大批量焊管或棒材的表面探伤，一般选用配有**穿过式自比线圈**的自动探伤设备。

- 1) 对被检工件进行预处理，除去表面污物及吸附的铁屑等；
- 2) 确定检测方法；
- 3) 根据相应的技术条件或标准来制备对比试样；
- 4) 调整传送装置，使试件通过线圈时无偏心、无摆动。



2、确定检测频率

200 Hz-6MHz。由被检工件厚度、所希望的透入深度、要达到的灵敏度等来选择。

频率越低，透入浓度越大，但降低频率的同时，检测灵敏度也随之降低。

3、调整仪器

选定仪器的平衡形式：自动、手动，或不需要

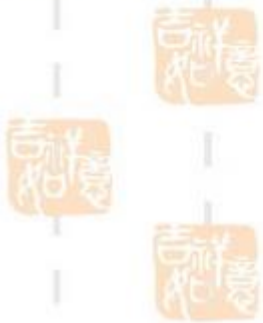
- 选定灵敏度
- 相位调节
- 选择滤波器形式及频率
- 调节报警电瓶
- 调节好记录器的灵敏度
- 调节标记装置的延迟时间
- 决定自动分选档级



4. 检测

在选定规范下进行检测，应尽量保持固定的传送速度，同时保持线圈与试件的距离不变。

- 经1h-2h生产检验，并对标准伤进行一次复探，合格后可继续进行生产检验。
- 对标准伤进行反复探测，看能否满足检测要求





5. 记录



1. 试件情况
2. 探测条件
3. 根据验收结构评定探测标准
4. 检测人员有关事宜



6.5 涡流检测的应用

一、涡流探伤

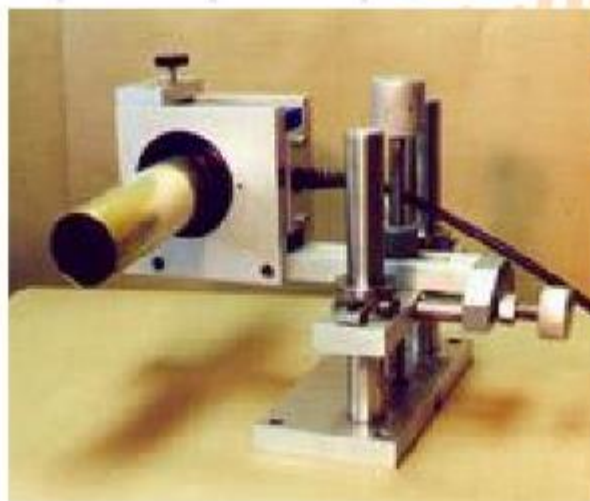
涡流探伤能发现发现**导电材料表面和近表面的缺陷**，且具有简便，不需耦合剂和易于实现高速、自动化检测的优点，故而在金属材料及其零部件的探伤中得到了广泛应用。

- 1.金属管材探伤
- 2.金属棒材、线材和丝材的探伤
- 3.结构件疲劳裂纹探伤

■ 1.金属管材探伤

用高速、自动化的涡流探伤装置可以对成批生产的金属管材进行无损检测。

管材从自动上料进给装置等速、同心地进入并通过涡流检测线圈，然后分选下料机构根据涡流检测结果，按质量标准规定将经过探伤的管材分别送入合格品、次品和废品料槽。



- 小直径管材（直径 $\phi \leq 75\text{mm}$ ）探伤通常采用激励线圈和测量线圈分开的感应型穿过式线圈。
- 适宜检测凹坑、短屑、发裂、折叠和裂纹等缺陷。

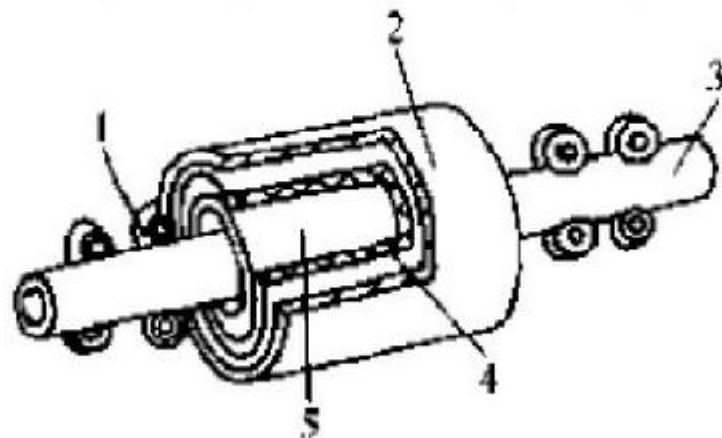
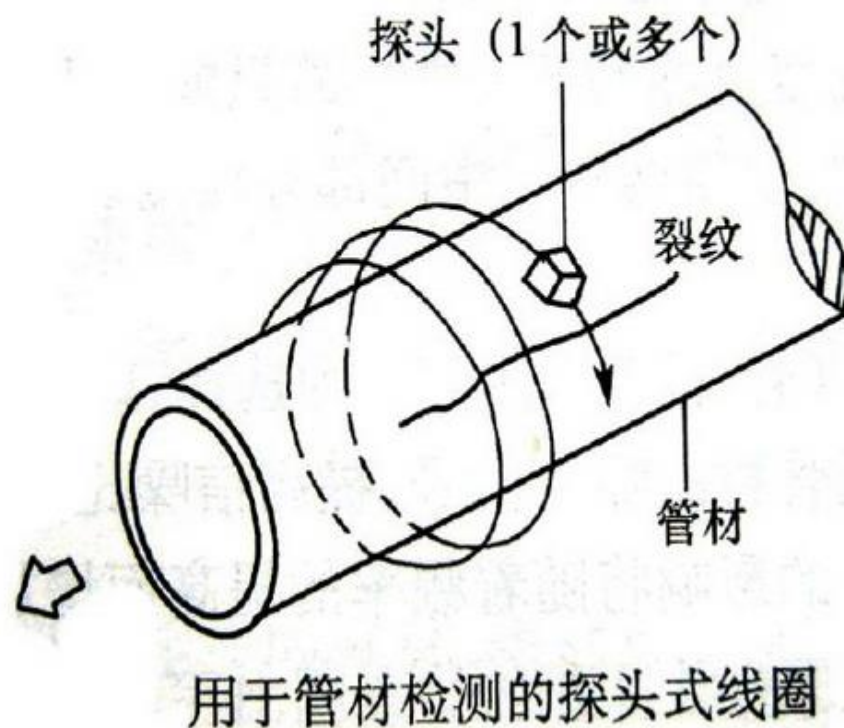


图 3-13 检测管材的穿过式线圈
1—V 形滚轮 2—磁饱和线圈 3—管材
4—激励线圈 5—测量线圈

- 当检测管材的轴向裂纹或管材的直径超过75mm时，宜采用小尺寸的探头式线圈以探测管材上的短小缺陷。
- 优点是提高检测灵敏度，但探测效率比穿过式线圈低。



2. 金属棒材、线材和丝材的探伤

- 棒材表面以下较深的缺陷，选用比同直径的管材探伤低一些的工作频率，
- 金属丝材探伤选用较高的频率。

3. 结构件疲劳裂纹探伤

- 常用涡流探伤来检测飞机结构件的疲劳裂纹。
 - 专用探头式线圈可检出在机翼大梁、衍条与机身框架联接的紧固件孔周围、发动机叶片、起落架、旋翼和轮毂等部件产生的疲劳裂纹；
 - 对飞机上容易产生疲劳裂纹的部位或重要的零部件实行飞行监控，以此来保证飞行安全。

二、材质检验

1. 材料成分及杂质含量的鉴别

- 金属的电导率值受其纯度的影响，杂质含量增加电导率就会降低。
- 简单、方便、高效的优点。

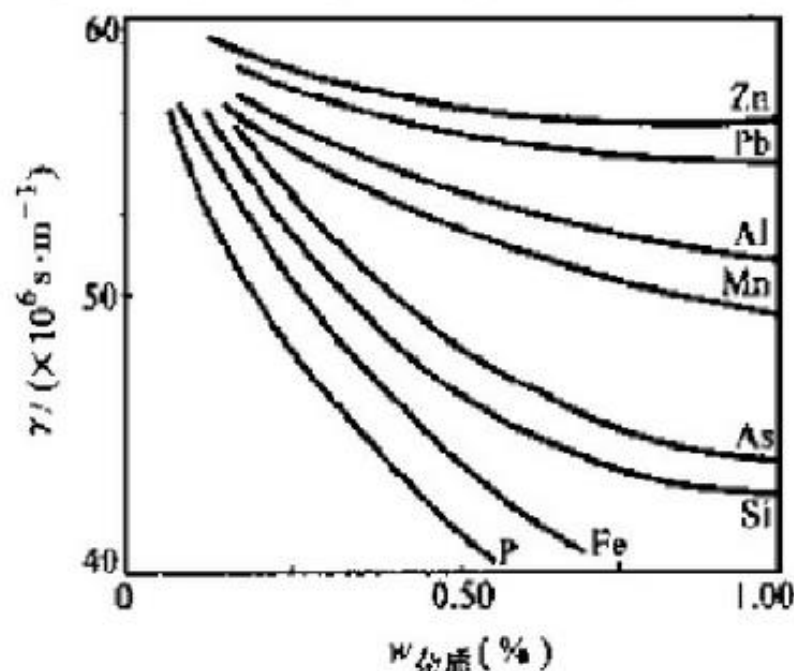


图 3-16 铜中杂质的含量与电导率的关系

■ 2. 热处理状态的鉴别

- 由于相同的材料经过不同的热处理后不仅硬度不同，而且电导率也不同，因而可以用测量电导率的方法来间接评定合金的热处理状态、硬度、强度。

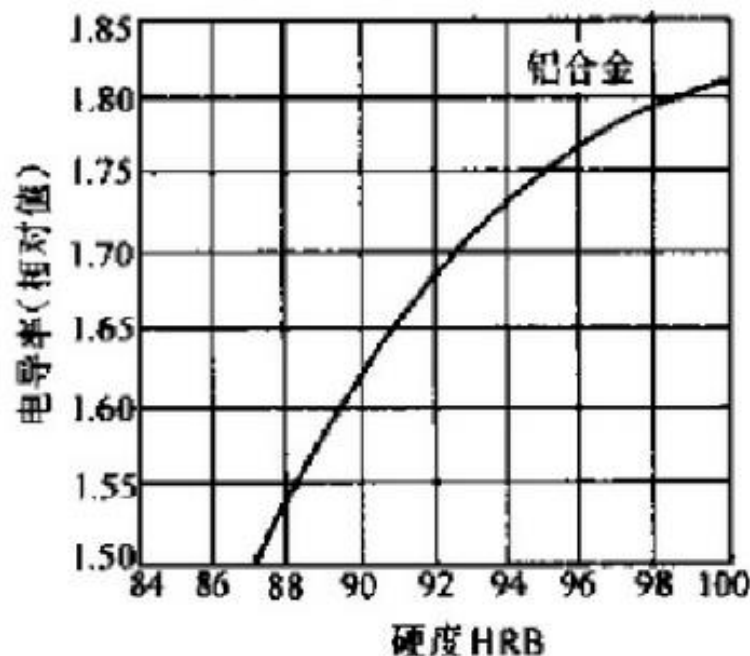


图 3-17 时效硬化铝合金的
硬度与电导率的关系

3. 混料分选

- 如果混杂材料或零部件的电导率的分布带不相互重合，就可以利用涡流法先测出混料的电导率，再与已知牌号或状态的材料和零部件的电导率相比较，从而将混料区分开。
- 注意厚度（材料厚度至少为渗透深度的**3倍**）、温度、材料表面状态

4. 涡流测厚

(1) 覆层厚度测定

- 绝缘材料/非磁性金属材料：铝合金表面阳极氧化膜、涂层
- 顺（抗）磁性材料/顺磁性材料：顺磁性材料表面Cu、Cr、Zn镀层、奥氏体不锈钢表面渗氮层
- 绝缘或顺磁性材料/铁磁性材料：钢表面涂层、镀铬层

涡流测厚

电磁感应测厚

测厚原理：

- ◆ 探头时线圈靠近工件时，线圈阻抗的改变量与材料的电导率、磁导率、检测频率以及线圈与工件间距离变化的影响
- ◆ 检测非磁性材料时，当检测频率和电导率为定值时，线圈的阻抗（感应电压）将随表面覆膜厚度的不同而变，进而通过线圈阻抗的变化即可测定材料表面覆膜的厚度
- ◆ 工件电导率变化和太薄影响测厚精度，通常采用高频测厚（25MHz）来抑制这两种干扰。