

# 材料探伤法

B·C·索柯洛夫 著

卢 鼎 赵冠生 译

中国工业出版社

# 材 料 探 伤 法

B·C·索柯洛夫 著

卢 鼎 赵冠生 译

樊 东 黎 校

中 国 工 业 出 版 社

本书系金属探伤的实用参考书。书中介绍了广泛采用的一些物理方法，即磁力法，荧光法，超声波法以及射线探伤法。

书中列有大量曲线图，借助于这些曲线图，可以有效地检验各种制品的质量，书中对所用探伤设备亦作了较为详尽的介绍。

本书主要供机械制造工厂材料检验人员参考。

В. С. Соколов

ДЕФЕКТОСКОПИЯ МАТЕРИАЛОВ

Госэнергоиздат 1957

\* \* \*

材料探伤法

卢 翊 赵冠生 译

樊 东 黎 校

\*

机械工业图书编辑部编辑（北京苏州胡同141号）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经营

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$  · 印张 13 · 字数 304,000

1963年7月北京第一版·1963年7月北京第一次印刷

印数 0,001—C2,646 · 定价(10-6)1.70元

\*

统一书号: 15165 · 2124(一机-453)

# 目 录

## 序 言

### 第一章 磁力探伤

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 一、概述 .....            | 5  |
| 二、磁粉探伤的物理基础 .....     | 5  |
| 三、零件的磁化法 .....        | 6  |
| 四、磁化电流值的确定 .....      | 14 |
| 五、磁粉及其制备 .....        | 14 |
| 六、零件在磁力探伤后的退磁 .....   | 15 |
| 七、磁粉探伤法显示缺陷的灵敏度 ..... | 15 |
| 八、磁带记录磁相探伤法 .....     | 17 |
| 九、以电气仪表指示的磁力探伤法 ..... | 19 |
| 十、磁力探伤仪器结构的举例 .....   | 21 |
| 参考文献 .....            | 28 |

### 第二章 荧光探伤法

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 一、概述 .....              | 29 |
| 二、发光现象的物理实质和荧光探伤法 ..... | 29 |
| 三、探伤用的发光物质及其特性 .....    | 31 |
| 四、发光的激发源 .....          | 33 |
| 五、几种实用的荧光探伤法 .....      | 36 |
| 六、表面缺陷的着色探伤法 .....      | 39 |
| 参考文献 .....              | 41 |

### 第三章 超声波探伤

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 一、概述 .....                                | 42  |
| 二、超声波、超声波的性质及其传播规律 .....                  | 42  |
| 三、超声波探伤的物理基础 .....                        | 49  |
| 四、用于探伤的超声波的获得方法 .....                     | 50  |
| 五、连续发射的超声波探伤仪(投影法) .....                  | 53  |
| 六、用电子示波管显像的超声波显微镜 .....                   | 64  |
| 七、B. C. 索柯洛夫和B. Д. 达尔达可夫斯基设计的超声波探伤仪 ..... | 67  |
| 八、脉冲反射式超声波探伤仪 .....                       | 68  |
| 九、谐振式超声波探伤仪 .....                         | 77  |
| 十、超声波探伤仪晶体夹持器(探头)的构造 .....                | 82  |
| 十一、超声波探伤仪应用的几个实例 .....                    | 87  |
| 参考文献 .....                                | 104 |

### 第四章 射线探伤

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| 一、概述 .....                                                | 105 |
| 二、X射线, 其性质和获得方法 .....                                     | 105 |
| 三、放射性辐射, 其性质及获得方法 .....                                   | 106 |
| 四、测量 $\gamma$ 射线和X射线的通用单位 .....                           | 111 |
| 五、放射性辐射活度的度量单位 .....                                      | 112 |
| 六、电离辐射( $\alpha$ 和 $\beta$ 粒子, X和 $\gamma$ 射线)的一般性质 ..... | 114 |
| 七、X光机的结构 .....                                            | 122 |
| 八、电子感应加速器 .....                                           | 128 |
| 九、 $\gamma$ 射线探伤用的仪器和设备 .....                             | 131 |
| 十、用射线探伤法检验材料内部缺陷的物理基础。透照探伤时显示缺陷的方法 .....                  | 136 |
| 十一、缺陷的射线照相显示法 .....                                       | 137 |
| 十二、射线探伤过程中影响照相法灵敏度的主要因素 .....                             | 138 |
| 十三、射线透照探伤法的感光度与曝光时间的各种实用曲线 .....                          | 146 |
| 十四、射线透照探伤用的X光底片及其光学处理 .....                               | 153 |
| 十五、X射线透照探伤暗盒的结构及底片装填方式 .....                              | 158 |
| 十六、射线透照操作技术 .....                                         | 161 |
| 十七、各类工件透照举例 .....                                         | 165 |
| 十八、焊缝透照法 .....                                            | 168 |
| 十九、透照时缺陷的肉眼直接观察法 .....                                    | 179 |
| 二十、透照结果的电离记录法 .....                                       | 183 |
| 二十一、发光晶体在探伤中的应用 .....                                     | 187 |
| 二十二、用光敏电阻(半导体)探伤的可能性 .....                                | 191 |
| 二十三、X和 $\gamma$ 射线透照时的安全技术 .....                          | 192 |
| 参考文献 .....                                                | 202 |

### 附 录

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 1 Y3Д-7H型超声波探伤仪线路元件明细表(图3-39) ..... | 204 |
| 2 工业 $\gamma$ 射线探伤安全规程 .....        | 206 |

## 序 言

现代机械制造业迅速发展的标志是：机器效率、高速性和經濟效果的不斷提高，机器零件单位負荷的增加，以及工业設備中工作介质压力和溫度的显著提高。所有这一些都不得不对机械制造材料的质量和性质的均匀性提出很高的要求。

因此，材料质量的物理檢驗方法具有重大的意义，这种方法不需要切取試样或破坏成品，且效率高。

目前研究得最彻底并被广泛应用的材料质量物理檢驗方法有：磁力法，荧光法，超声波法，以及X-射綫和 $\gamma$ -射綫透照法等。但这些方法沒有一种是万能的，每一种都有自己的优缺点和应用范围，在发现缺陷方面各具有一定的灵敏度和准确性。在实际应用中，根据有关机械零件质量檢驗的技术条件，常常須在現有方法中选定最合适的一种。同时，探伤工作的經驗表明，常常不是使用某一种方法，而是两种方法并用，即一种作預先檢驗，另一种作最終檢驗。

为了正确而全面地檢驗机械制件和材料的质量，以发现粗視缺陷，每一个探伤工作者应掌握現有的一切物理探伤方法。遺憾的是，在技术檢驗机构中，能自如掌握一切物理探伤方法，并加以綜合应用的探伤工作者还极少。这主要因为在历史上，各种探伤方法，是彼此沒有关联地发展起来的。因此形成了一种錯誤意見，认为各种探伤方法彼此間沒有任何联系，尽管这些方法的共同任务是材料探伤，这一点恰恰表明这种意見的錯誤。其次还存在这样的看法，认为既然各种物理探伤方法的基础，是广泛地利用了牵涉到物理学各部分的現象，而且以无綫电和电子技术作为基础的各类現代探伤仪的构造又是非常复杂的，所以一个专家不可能深入了解所有探伤方法。

著者试图在本书中叙述研究得較為透彻的、并在工业中采用的一些探伤方法，尽可能地說明各方法間的联系，以及綜合使用的可能性。

书中叙述了某些新的原理和提出来的仪器示意图。这些仪器虽然在实际中还没有得到广泛应用，但已成功地通过了实验室的試驗。这样，可以使探伤工作者能較清楚地看出各种探伤方法在最近和将来的发展方向，推动許多人进行各自的、新的研究，而不致重复已往的錯誤或正在进行的工作。

显然，要在一本书中綜合探伤工作所积累起来的全部經驗是不可能的，因此納入书中的只是一些主要的材料。

著 者

# 第一章 磁力探伤

## 一、概述

在苏联，大约自1934年开始在工业中利用磁力探伤，当时阿庫洛夫（А. С. Акулов）教授設計出利用磁粉檢查缺陷的第一个磁力探伤仪。此后，这一方法在飞机制造业和重型机器制造业中得到了广泛应用。

在叶列明（Н. И. Еремин）领导下的中央机器制造与工艺科学研究所的磁性試驗室和在希加特罗（А. В. Жигadlo）领导下曾經制就工业用探伤仪的全苏航空材料研究院对磁粉探伤进行过广泛的研究。最近，苏联国家矿山技术檢查局的中央試驗室也大規模展开了这方面的研究工作。这个試驗室設計成許多带有磁力探测器的新型探伤仪。为了檢查某些管道的焊縫，全苏石油建筑科学研究所設計了磁帶記錄探伤仪。

可是在工业上对这种方法还有一些估計不足之处，显然，这和該法还未十分普及有关。

磁力探伤是沿着两个方向发展的：1）使用磁粉及磁性悬浮液；2）使用电气仪表作为指示器。以下就这两方面作詳細研討。此处不拟討論金屬的显微組織磁力分析問題以及利用磁粉探伤法研究其他金屬學的問題。

## 二、磁粉探伤的物理基础

在磁力探伤法的实际运用中，在許多場合下用鉄磁粉末来显示缺陷，因而这种方法就叫做磁粉探伤法。

只有对鉄磁性金屬才可应用磁粉探伤。鉄磁性金屬包括鉄、鎳、鈷和其許多合金，以及碳素鋼和某些合金鋼。

为了弄清金屬磁力探伤时所發生的現象的

实质，这里叙述一下初等物理中为大家所熟知的若干現象。

大家知道，在任何一块永久磁铁的周圍分布有磁場。我們不能直接观察到这个磁場，而只能观察到它对某些鉄磁微粒或电气仪表的作用。

試回想一下学校里做过的实验。把一張撒有鉄屑的紙放在馬蹄形磁铁上，輕輕抖动紙面，鉄屑就从一极通向另一极，像許多条綫散布在紙上。磁铁两极附近还积聚着一些鉄屑。在这种場合下，鉄屑組成的鏈状綫就是存在磁場的标志。

再回忆另一个学校实验。若将某一磁铁折成两截，則每截的两端仍然形成两极——N极和S极。

不管我們將磁铁折成多少部分，靠近新的两端总将形成两个磁极。

探伤时，常常用可以获得强烈磁場的电磁鉄来代替比較微弱的永久磁铁。如果在这种电磁鉄上放上一个鉄片，它就紧貼在电磁鉄的两极上。在这种場合下磁力綫将通过鉄片。如果在鉄片上撒上鉄磁粉，那末，像在紙上一样，粉粒将在鉄片上排成由一端通向另一端的鏈状綫，并且将在磁铁两极附近产生积聚。因此，

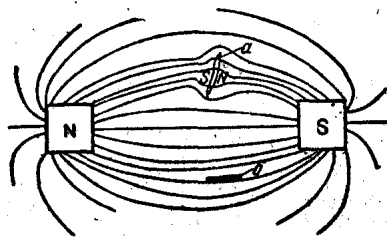


图1-1 磁极的构成及缺陷边界附近磁場的分布情况：

a—横截磁場的缺陷；b—与磁場方向一致的缺陷。

我們凭借磁粉微粒可以观察到鉄片上磁力綫的分布情况。

假如置于电磁鉄上的鉄片有裂縫状的缺陷,在此情况下,由磁粉微粒形成的鏈状綫在裂縫附近将变更方向,而磁粉粒亦将聚集在裂縫边界处。

这种現象可以簡略地作如下解釋。鉄片上的缺陷可以和上述的折断了磁鉄例子相比拟。像在折断磁鉄的两端一样,鉄片上缺陷边界也会形成新的磁极——N极和S极(图1-1)。缺陷边界的磁場方向将与它的每一点上的切綫相垂直。如果缺陷为弯形裂縫,則磁粉的鏈状綫將彼此截断,并在缺陷附近形成粉粒聚集。

欲用磁力法显示金屬中的缺陷,必須首先将被檢驗的金屬磁化。

缺陷的位置与磁場方向相垂直是磁力探伤的重要条件,在大多数場合下甚至是必要的条件。如果缺陷的位置与磁場的方向一致,可能檢查不到缺陷,因为此时漏磁磁場可以小到不能被发现(图1-1)。这种現象可以与有障碍物的水流对比。带銳边的长方形障碍物橫截水流,可以引起水分子的强烈搅动或改变水流方向;如果这种障碍物順水流方向放置,水分子的搅动将很小,甚至觉察不到。

### 三、零件的磁化法

磁力探伤法的效率与被檢查工件的磁化方法大有关系。磁化的方法有数种。

a) 电磁鉄磁化法 利用电磁鉄可以获得强大的磁場。电磁鉄的主要零件为磁导体(鉄心)1和磁化綫圈2(图1-2)。电磁鉄可以用直流电也可以用交流电。使用交流电时,为了避免因渦流而发热,电磁鉄鉄心应当用变压器硅鋼片迭积而成。

在鋼制件中利用电磁鉄不仅可以探明表面缺陷,而且可以探明内部缺陷。为此,电磁鉄必須用直流电,此时集肤效应(即把电流排向

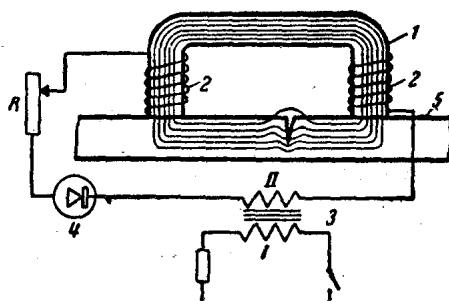


图1-2 用电磁鉄磁化金屬:  
1—鉄心(軛); 2—綫圈; 3—变压器(交流供电时); 4—整流器; 5—被檢驗对象。

表面的現象)不会出現,而被檢驗零件的整个断面就能磁化。

应用連續試驗的方法(即在被檢驗零件上撒盖磁性悬浮液或干磁粉需与磁化过程同时进行)是发现内部缺陷的必要条件。用剩磁法来探明内部缺陷的效果非常不好。

鉄磁材料进行磁力探伤时,不仅可使用尺寸不同的固定式电磁鉄,还可使用手提式电磁鉄。后者能使大型制件的各个部分磁化,并在其中发现表面或表面层下的缺陷。

应当指出,檢驗直徑不大的圓形制件时,鉄心两极平面与零件表面可能不是紧密接触的,此时两极与零件之間將有很大的間隙。間隙的磁阻很大,漏磁亦大,因而这种探伤方法的效果甚微。当成批地檢驗同类型的圓形制件时,电磁鉄两极按照零件表面的半徑制成凹形。

图1-3 为使用手提电磁鉄檢查蒸汽鍋炉汽

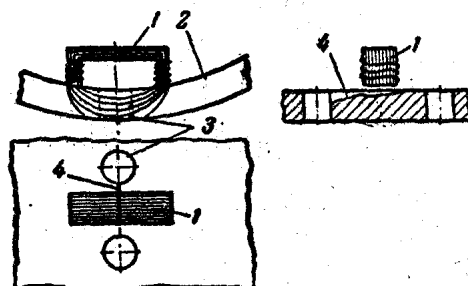


图1-3 利用电磁鉄发现蒸汽鍋炉的晶間裂縫:  
1—电磁鉄; 2—被檢驗金屬; 3—管孔; 4—裂縫。

包管柵內晶間裂縫之一例。图 1-4 a, b 和 c 所示为手提电磁铁以及利用它发现的大容积容器上的表面裂縫示意。

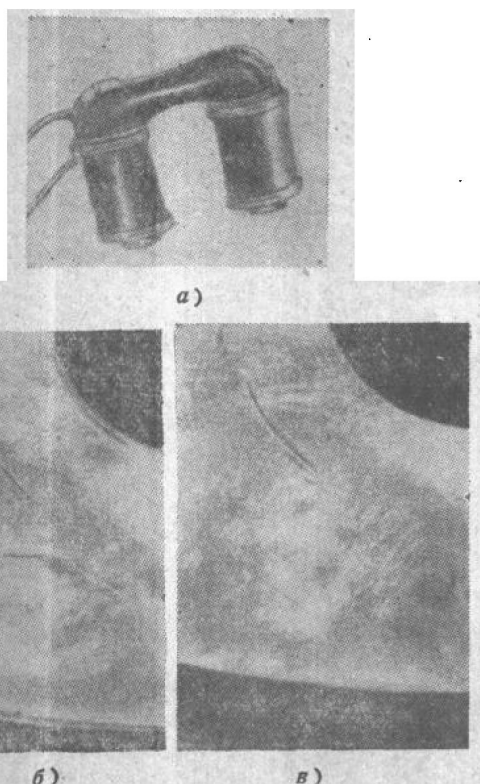


图 1-4

a—使直徑較大的容器表面磁化以檢查表面裂縫的电磁铁（全苏化工机器制造科学研究所照片）；  
b—磁化时在容器焊缝上发现的外部裂縫；c—同一地方磁力探伤前的情况。

为了檢查蒸汽鍋爐汽包內管压制突緣上晶間环形裂縫，无須自汽包內将管子卸下，工程师密霞尼諾夫（И. А. Мещанинов）（国营地区发电所与輸电綫路組織及合理化托拉斯）建議用图 1-5 所示的特制电磁铁。

电磁铁由直徑为 1 毫米的导綫繞成的綫圈及中空鉄心組成。綫圈安-匝数为 4000~4500，电阻为 4.1 欧姆。为了强化磁場并使导磁体与磁化的金屬有較好的接触，在鉄心上套上两个形同法兰盘的极靴——一个在内部，另一个在外部。

管子被檢驗部分可以視作封閉磁場的电磁銜鉄。

欲檢驗各种直徑的管子，在探伤仪中只拆換法兰盘可卸环之煩板即可。

如管子接头被压合在鍋爐聚汽管上时，可用长手柄将仪器通过窺視孔放入管道中。

一根管的檢查時間不超过 1~2 分钟。电磁铁可用电流为 6 安，电压为 24 伏的蓄电池或整流器供电，用磁粉悬浮液作为显示剂。这种悬浮液用喷射器通过下部外法兰盘的孔喷射到管子内表面上。最好用端部带小孔的普通自行車打气筒作为悬浮液喷射器。在磁化和喷射完悬浮液后，小心地从管中拿走探伤仪，并檢查管子的内表面。

6) 螺管綫圈磁化法 利用螺管綫圈和电磁铁一样可以得到磁化零件足够强的磁場。此时，被檢驗的零件本身就成了繞綫的鉄心。

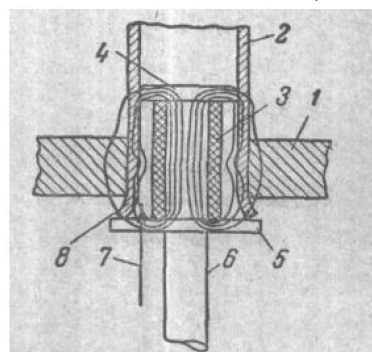


图 1-5 用来檢查蒸汽鍋爐压合管接头中裂縫的电磁铁：

1—鍋爐汽包；2—被檢驗的管子；3—电磁铁綫圈；  
4—电磁铁上法兰盘；5—电磁铁下法兰盘；6—长手柄；7—悬浮液喷射处；8—管中的环形裂縫。

长螺管綫圈的磁場是足够均匀的。磁場强度—— $H$ 与綫圈匝数、电流及螺管綫圈长度有关，即

$$H = \frac{0.4\pi nI}{l},$$

式中  $n$ ——綫圈匝数；

$l$ ——螺管綫圈长度（厘米）；

$I$ ——直流电流值（安培）。

螺管綫圈可用直流电，也可用交流电。磁力探伤常常使用能移动的螺管綫圈（图 1-6）。在这种情况下，通常使用綫圈的两个串連部

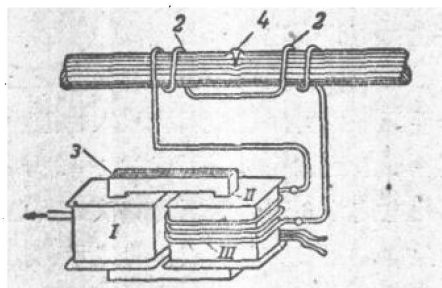


图1-6 利用螺管线圈探伤:

- 1—被檢驗零件; 2—磁化线圈;  
3—电焊变压器; 4—缺陷处漏磁磁通。

分間的一部分磁場，以便仔細檢查零件的表面。

1929年馬特維也夫 (А. Н. Матвеев) 和柯列斯尼可夫 (А. Н. Колесников) 就实际运用螺管线圈来檢查車厢軸頸、軸輓、汽輪机轉子及各种管件的质量。利用可移动的或一般的螺管线圈磁化，很易檢查出管子焊接接头和蒸汽鍋爐汽包环縫內的最微細的裂縫。

簡要地列举一下利用螺管线圈檢驗焊接接头中微裂紋的实例。如直徑最大到 300 毫米，壁厚到 25 毫米的高压管接头的焊接通常要放置內垫环和經常采用多道焊接。开始焊接时先在焊縫頂上沿縫的四周全部敷焊上第一道焊縫。

經驗表明，由于垫环的构造不正确或是由于垫环修整得不好，当第一道焊縫焊完和冷却后，在焊縫中会形成細微裂縫。有时候也由于第一道焊縫的熔补金屬比管子基本金屬冷却快而造成裂紋。

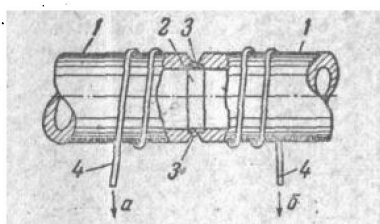


图1-7 利用螺管线圈磁化管子焊接接头以檢查第一道焊縫上的裂縫:

- 1—被焊接管子端部; 2—垫环;  
3—第一道焊縫; 4—磁化线圈。

为了发现这些微細裂縫，第一道焊縫在焊

补后需用鋼刷清洗。在管子(图1-7)焊縫的两旁纏上 2~3 匝电纜。电纜接自电焊变压器，并通以电流。如此焊接接头金屬就被磁化。然后，借助磁粉便可容易地发现裂縫。

为了发现蒸汽鍋爐鉚接縫上的晶間裂縫，在去除鉚釘以后，有时用所謂电纜穿孔法来檢驗。

事实上，在搭接板鉚接縫中发现晶間裂縫，現在已經沒有多大困难，例如甚至不用取出鉚釘，只要用超声波法即可发现，这方面将在本书的有关章节中加以敘述。用磁化法可发现鍋爐汽包搭接板間母材鉚接縫中的裂縫。虽然要拔去鉚釘，但此方法仍然較為有效。

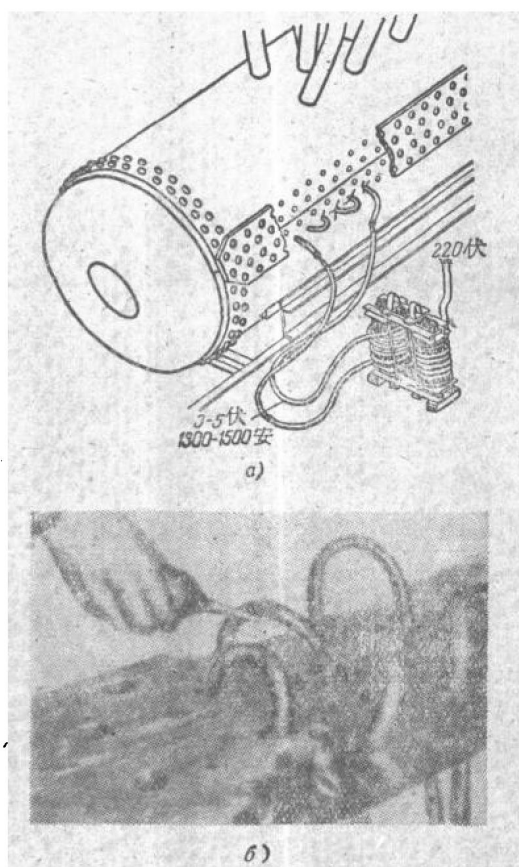


图1-8 蒸汽鍋爐汽包上鉚釘孔間晶間裂縫的檢查:

- a—磁化裝置; б—鉚釘孔表面上敷以磁懸浮液。

为了显示这种裂縫，来自电焊变压器的一根电纜应通过几个相邻的鉚釘孔（用电纜穿过这些孔）(图 1-8 a 和 б)。通过电纜的电流为

1300~1600安培，电压为3~6伏特。此时，铆钉孔附近的金属已完全磁化，利用磁粉即可发现搭接板或锅炉汽包母材上铆钉孔表面的晶间裂纹。检查铆钉孔时可用低压电灯照明。

**б) 电磁铁封闭铁心产生的感应电流磁化法** 要想磁化空心零件或圆盘状零件及有孔齿轮，可以使用开口铁心的电磁铁。铁心的间隙用直径等于零件孔径之铁棒闭合。孔内插有铁棒的试件置于电磁铁铁心间隙中（图1-9）。这种磁化原理与电流互感器的工作原理相同。电磁铁用交流电供电。铁心中的交变磁通使零件中产生感应电流，此感应电流即使零件磁化。利用这种方法可以有效地检查火车钢轮和汽轮机叶轮上的裂纹。利用感应电流磁化的磁粉探伤法显示出渗碳钢齿轮齿上的裂纹示于图1-10。

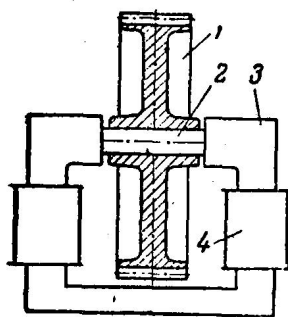


图1-9 利用电磁铁封闭铁心产生的感应电流磁化零件：

- 1—被检测零件（齿轮）；
- 2—使电磁铁磁通闭合的铁棒；
- 3—电磁铁铁心；
- 4—电磁铁线圈。

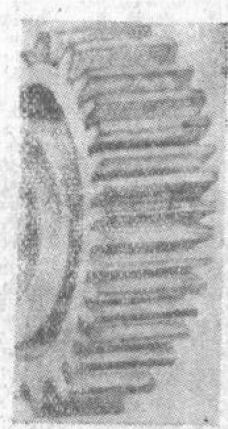


图1-10 以感应电流磁化后用磁粉检查出来的齿輪上的裂纹。

**г) 电流通过试件磁化法（圆周磁化）** 如果在试件上通以电流，则像在导体周围一样，零件周围即产生圆周磁场。磁场方向与电流方向相垂直。圆周磁化时磁场无极性。

圆周磁化时，无论使用直流电或交流电均为低压强电流。在电压为3~6伏时，电流约为1200~1500安培。在个别场合，磁化电流可达9000~10000安培。

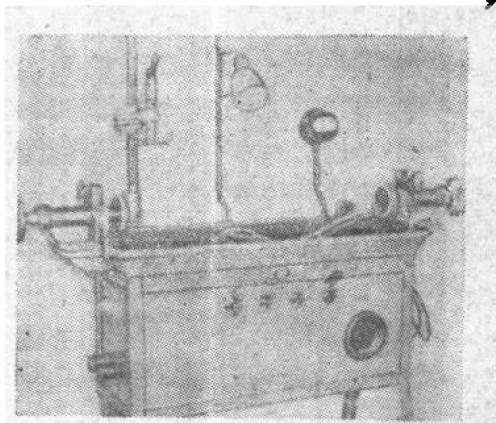


图1-11 UHB-2型（中央机器制造与工艺科学研究院）磁力探伤仪外观。

用直流电磁化零件时，不仅可以检查表面缺陷，而且可以检查表面层下的缺陷。这是因为直流电的密度在导体的整个横截面上是一样的，因而磁通在试件的整个截面上也是均匀的。

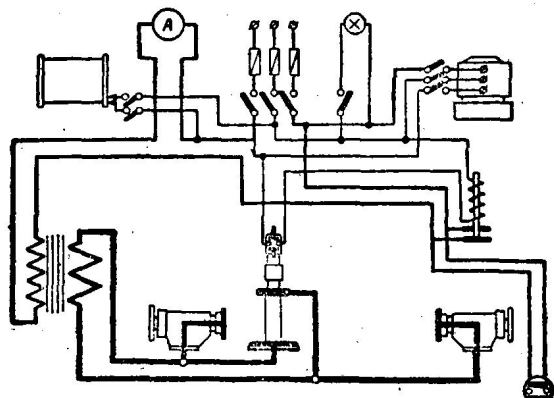


图1-12 UHB-2磁力探伤仪的线路。

用交流电磁化时，由于产生所谓集肤效应，电流的密度在表面区要大些，因而被磁化零件表面附近的磁通密度也要大些。由于这个缘故，在用交流电磁化时只能检查表面缺陷。由此可见，如果检查的只是表面裂纹，就没有必要使用直流电，因为使用它有许多不便，例如必须配备专用整流器等。

使用交流电进行圆周磁化的磁力探伤仪，在工业上比其他类型的探伤仪用途更广。

UHB-2型中央机器制造与工艺科学研究院设计制造的探伤仪得到了广泛的应用。

LJHB-2 型探伤仪的外观如图 1-11 所示，其线路联结列于图 1-12 中。

利用这种探伤仪，以电流磁场将试件圆周磁化。该电流或直接通过被检验零件，或通过置于被检验零件内部的钢棒。探伤仪附有搅拌悬浮液并把它送至特制浇注器的泵、照明装置及检视用的电流表和退磁箱。

用探伤仪检验零件可以用剩磁法，也可以用施加磁场的方法。该仪器的主要优点是不要专门组织工作地点，因为磁化、冲浇磁性悬浮液、观察及退磁都在同一设备中进行。

此探伤仪可用来检验长度为 1100 毫米，直径为 150 毫米以内的小型钢铸件。更长的零件如管件，可以逐段进行试验。方法是把各该段管子放在同一探伤仪的两个接触棱形体上。

探伤仪用电压为 220 伏的交流电源供电，在电流为 1500 安时，输出端的电压为 5 伏。

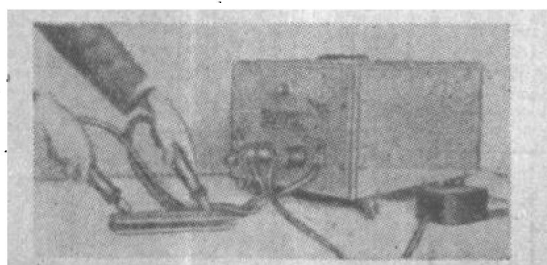


图1-13 手持式接触器（笔式触头）。

不仅可用固定的探伤仪，也可用各种接触装置进行圆周磁化。后者可以分段试验大型零件，以及定期检查未经拆卸的机器零件。中央机器制造及工艺科学研究院推荐使用电磁接触器（磁螳螂）作为这种装置。电磁接触器由铝质外壳组成，其中置有线圈及用软铁制成的铁心，铁心和两个铁制的活动侧板相联接。外壳上固定有两块铜板以接入电缆，铜板借挠性铜条与铜接触网联接。主要的磁化电流就是通过此网供给被检验金属的。

电磁接触器（磁螳螂）安装时通常彼此相隔 200~300 毫米，以保证被检验表面、磁螳螂侧板和接触网之间的紧密接触。这样就可以调节用翼形螺母固定的活动侧板位置。当电流通入

电磁线圈时，磁螳螂就被紧紧地吸在零件表面。这样，检验时手中就不必再拿带电电缆的触头。

在许多场合中，特别在检查焊缝时，采用图 1-13 所示的不带电磁铁的手持式触头更为有效。

这种触头，有时称为“磁笔”，主要用来检查形状复杂的零件，如钢轨、管子焊缝、带螺纹孔的圆形零件及蒸汽锅炉汽包等的表面缺陷。

在检查栅管或蒸汽锅炉铆钉孔间的裂缝时，可以利用插在这些孔中的塞柱通入电流使之磁化。各种塞柱按照不同孔径用木头做成，并绕上铜栅。接自变压器的电缆通过特种夹持接头与铜栅相连接。塞柱紧紧插入孔内。然后接通电路。此装置如图 1-14 所示。

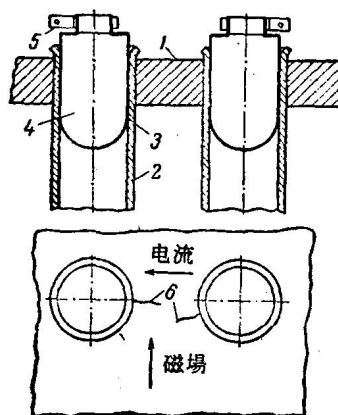


图1-14 通过蒸汽锅炉管孔和铆孔导入电流的塞头式接触器：

- 1—汽包；2—管子；3—铜接触网；4—木塞；  
5—磁化电流引入接头；6—裂缝。

为了用电流磁化法检查成批产品的质量，制成了一种能迅速检查产品的特种探伤仪。

当缺乏特种探伤仪时，欲用电流磁化制件可以使用各种电力变压器或电焊变压器。例如功率为 100 仟伏安的 IIIA 型电焊变压器就能进行磁化，可检查大功率的柴油机和蒸汽机的曲轴、机车车轴或车厢轴、高压管道，分段检验各种尺寸的蒸汽锅炉汽包等工件的质量。

因为这种变压器的初级线圈是分级的，那

末加在次級線圈上的电压以及电流值可以根据被檢驗零件的尺寸加以选择。

利用功率为10仟伏安的变压器的电流可以磁化并檢查中小型工件，如汽車发动机連杆、凸輪軸、軸承环、汽輪机叶輪、各种工具、管子的鋼制法兰盘、双头螺栓等等。

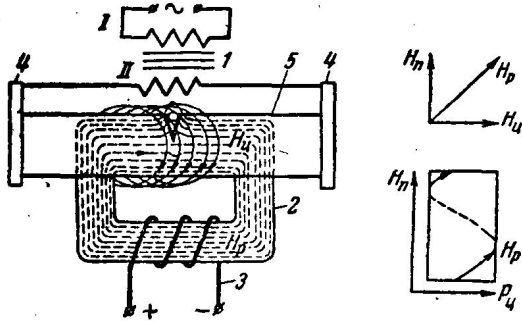


图1-15 螺旋磁化:

1—带初級線圈 (I) 和次級線圈 (II) 的电力变压器; 2—电磁鉄 鉄心; 3—使用直流电的电磁鉄線圈; 4—将交流电通入零件的接头; 5—被檢驗零件。

$H_n$ —直流磁場矢量;  $H_u$ —交变 (圓周) 磁場矢量;  
 $H_p$ —合成 (螺旋) 磁場矢量。

在变压器次級線圈与变压器初級線圈間的絕緣良好及变压器外壳接地良好的条件下，零件用电流磁化的一切操作对于工作人員是絕對安全的。

**A) 綜合磁化法** 前面已指出，用电磁鉄、螺管線圈或直接通电使零件磁化的方法，如果缺陷与磁場相垂直的話，可以很好地檢查出零件中的缺陷。如果缺陷順磁場方向，而且寬度又很小，則完全檢查不出。

欲檢查出位于磁場各种不同方向的缺陷，必須使零件在两个互相垂直的方向进行两次磁化。这种方法在实际运用中不方便，而且費时过久。为了消除此一缺点，就采用所謂綜合或螺旋磁化法，此法可以一次檢查出位于不同方向的缺陷。

用电磁鉄的纵向恒定磁場和交流电的圓周磁場同时使零件磁化，可以获得螺旋磁場。这两个磁場形成一个順螺旋線方向的合成磁場。

这种磁化線路可見图1-15。

根据这个极为有效的磁化法，制造出几种型式不同的可檢查各种零件的探伤仪。中央机器制造与工艺科学研究院制造的 MДВ 型探伤仪便是其中的一种 (见图1-16) [2]。

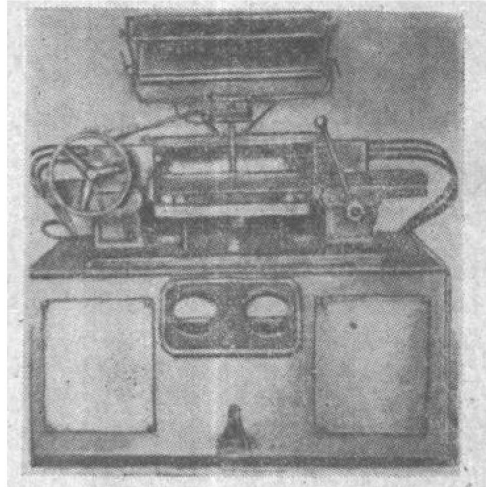


图1-16 MДВ 探伤仪外觀。

这种探伤仪的操纵完全是自动的。它有固定装置和旋轉装置，可以不重新安置零件，并在此方法的能力範圍內发现一切可能有的缺陷。

这种方法利用鉄磁粉悬浮液作为显示剂。

利用 MДВ 探伤仪，無論在有磁化磁場时或用剩磁法都可以檢驗零件。为了更好地观察零件，在探伤仪中装有特制的可移式照明灯。这种灯可以装在檢驗零件的最为方便的位置，但是須考虑到不使零件光澤表面反射的光綫刺眼。噴射悬浮液时，应当使零件旋轉，以便能够仔細观察零件的各个面。

MДВ 探伤仪的电气線路见图1-17。如图所示，在这种探伤仪中用变压器 2 进行零件的圓周磁化，用电磁鉄 1 进行恒定磁場磁化。借助于轉換开关 II 来調节交变磁場强度。此轉換开关与不同匝数的初級線圈接通。利用磁力开关按钮  $K_1$  和  $K_2$  接通交流和直流电。

**е) 脉冲电流磁化法** 近年来在电工技术的許多部門中，脉冲电流得到广泛应用。在无綫电定位器、脉冲 超声探伤仪和 X-光照相术等諸方面，都使用了脉冲装置。使用脉冲电流

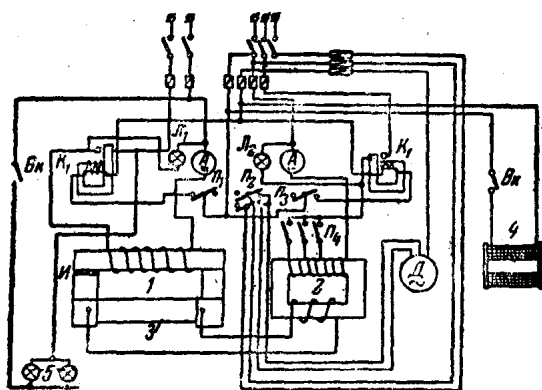


图1-17 MDB 探伤仪电气线路:

1—电磁铁; 2—使被檢驗零件圆周磁化的变压器;  
3—被檢驗零件; 4—退磁装置; 5—照明灯;  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$ —开关;  $\Pi_4$ —变压器线圈转换开关;  
 $\Delta$ —磁粉悬浮液抽送泵电动机;  $K_1$ —按钮开关;  
 $\Lambda_1$ ,  $\Lambda_2$ —信号灯;  $H$ —絕緣器。

的方式可以在外形尺寸很小的仪器中和截面很小的导线上获得非常强的电流。实际上, 短路时通过电路的电流, 要比通常大几十倍至几百倍。此时如果在电路上設有考虑限止一定电流的保險装置, 則电路本身不会被损坏。要使易熔保險絲在短路时被燒断, 必須经历几十分之一秒的时间。如果强电流通过电路的时间为千分之一秒或百万分之一秒, 則在此时间内保險絲不仅不会燒断, 甚至只是会稍微发热, 而导线就更不至于损坏。

在电气设备中使用脉冲技术的物理根据就在于此。这种电气设备使得从不大的电气装置中可以获得强电流。磁力探伤法中也可使用脉冲电流。

脉冲电流可以用好几种方法获得, 即利用电路上的熔断保險絲, 利用电容器放电, 利用各种机械断流器等等。使用电容器可以在线路中获得持續时间小于  $10^{-6}$  秒的脉冲电流。尽管这种强电流作用的时间間隔很短, 也可以用来磁化零件, 使之达到足以发现零件中缺陷的数值。

图 1-18 所示为一种磁力脉冲探伤仪线路原理图[6]。

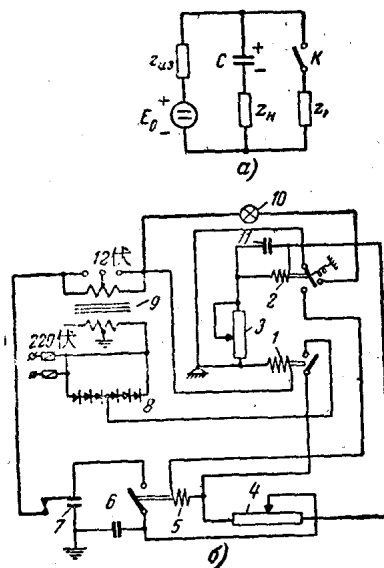


图1-18 中央机器制造与工艺科学研究院制造的脉冲磁力探伤仪线路:

a—线路原理图; б—工作线路图。

这种探伤仪的短暂脉冲发生器的作用原理在于电容  $C$  (图1-18 a) 可积聚能量, 并能迅速将能量发送给负载。

在此探伤仪中, 当脉冲持續时间为 1 微秒时, 电功率可达到 20 千瓦。在电路中, 除了电容  $C$ , 还有负载电阻  $z_H$ , 内电阻为  $z_{0s}$  的直流电源  $E_0$  和内电阻为  $z_K$  的开关。断开开关  $K$  时, 电容器  $C$  由电源充电。闭合开关时, 电容器  $C$  就通过负载电阻 (即通过被檢驗零件) 和开关电阻  $z_K$  迅速放电。

在发生器中采用水銀放电器 5 (图1-18)。

被檢驗零件夹在夹头 7 之間。继电器 5 和另外 2 个步調一致的继电器 1 和 2 在准确规定的瞬时自动工作。

在两次脉冲間隔的时间中, 电容器 6 通过有效电阻 4 充电。发生器由 220 伏电源通过全波整流器 8 供电。当用夹紧装置上的开关 7 将被檢驗零件夹在电极中时, 继电器 1 与变压器 9 的线路接通。经过一定的时间, 由于通过继电器 2 的电流增大, 就使安全继电器 5 的线路接通, 因而电容器 6 和被檢驗零件也接通。这种情况将在电容器充电到相当大的数值

时发生。电容器 6 将在短时间内放电。这段时间由电路负载及电容  $C$  的时间常数决定，而脉冲间隔时间则取决于电阻 4 及分路电阻 3 的比值。

这种探伤仪的电容放电瞬间的电流，按其作用相当于 3000~4000 安的直流电。尽管电流很大，短时脉冲电流也不致使零件烧坏。用不同方法磁化零件并用悬浮液进行检验时，探伤仪的生产率达每小时 1500 个零件。

利用上述探伤仪可以检查发动机连杆、轴、各种工具、齿轮、汽轮机叶片、管子、钢丝、活塞销、螺栓、圆钢、棒料、辊轴、钢带等等。

由于该探伤仪结构紧凑并可采用照明电源，可以用来进行机器各部分零件的周期检验，而不须拆除零件。

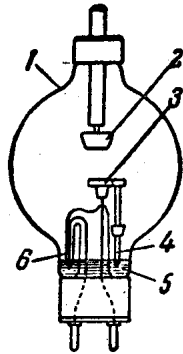


图1-19 引燃管（点燃器）结构图：

1—玻璃外壳；2—阳极；3—阴极；4—点燃头（引燃器）；5—汞阴极；6—与水银的连接线。

#### ж) 利用引燃断流器

**使零件脉冲磁化** 引燃管是带汞阴极的电子管（图1-19）。金属杆 4 即电子管中的断流触点（点燃器）。它由大电阻的难熔材料制成并浸入水银中。当送往点燃器的电压约大于 100 伏/厘米时，就在金属棒与水银面（表面）间发生电弧放电。电弧成为使阴极和阳极间主要放电电子的来源。放电是在电弧发生后经过几微秒产生的。引燃管电路中的电弧可以通过电容放电形成。

图 1-20 所示为引燃断流器的线路原理。借引燃开关可以用最大功率为 100 千伏安的瞬时脉冲电流使零件磁化。在此线路内引燃管靠闸流管来点燃。闸流管用 6C5 电子管组成的移相器的标准线路控制。通过负载的电流用转换开关  $abc$  接通。为了防止连续的一组脉冲电流经过负载，线路中考虑到与闸流管的回授。极短暂的脉冲电流送至闸流管的栅极，这种脉冲

电流是相对于供电线路电压按相位严格规定的。

利用移相器可以改变脉冲的相位，因用这种方法可以调节负载中脉冲电流的持续时间。

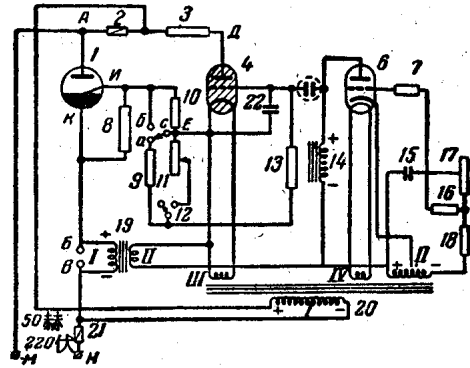


图1-20 ИП-5 型引燃断流器的线路原理图：

1—C-400 引燃管；2—直径 0.13 毫米的铜保险丝；3—50 欧姆，5 瓦绕线电阻；4—ТГ-213 闸流管；5—0.05 微法，400 伏电容器；6—6C5 三极管；7—5.1 兆欧，0.25 瓦电阻；8—4.7 千欧，0.25 瓦电阻；9—2.2 兆欧，0.25 瓦电阻；10—130 千欧，0.25 瓦电阻；11—3.3 兆欧，2 瓦可变电阻；12—ТБ-2-1 型 120 瓦翻转开关；13—1.2 兆欧，0.25 瓦电阻；14—18 厘米<sup>2</sup> 铁心的抗流线圈，绕组为 1200 瓦，ПЭВ-2 型导线直径为 0.25 毫米；15—0.01 毫法，400 伏 КБГИ 型电容器；16—1 兆欧，0.25 瓦电阻；17—1 兆欧，2 瓦可变电阻；18—51 千欧，0.25 瓦电阻；19—3.4 平方厘米铁心的回授变压器，绕组 I—2000 伏，0.15 毫米 ПЭВ-2 导线；绕组 II—2400 伏，导线直径 0.13 毫米；20—电力变压器，铁心为 12 平方厘米，绕组 I—220 伏，930 匝，导线 ПЭВ-2 型，0.31 毫米；II—2×220 伏，2×940 匝，导线 0.1 毫米；III—6.3 伏，29 匝，导线直径 0.4 毫米；IV—2.5 伏，13 匝，导线直径 2.6 毫米；21—直径 0.5 毫米之铜导线保险丝；22—1000 微法，500 伏电容器。

在三极管 6（图1-20）的栅极上，电压负半波开始的瞬间，电子管骤然关闭，在抗流线圈 14 上就出现电压达 100 伏之正峰值。

每一峰值都使闸流管 4 内的栅极电流流经电容 5。闸流管只有在电压到达峰值时方开启。压按钮  $abc$ ，闸流管阴极  $E$  就与引燃管 1 的点燃器  $H$  相联接。抗流线圈 14 上第一个电压峰值将使闸流管开启。电流按 МАДЕИКБВН 路

线流动，引燃管也被接通。从此时起到电路电压的半周期结束脉冲电流通过负载(BB接头)。引燃管中电压降不会超过15~20伏，因此几乎全部线路电压加在负载上。

负载上的脉冲电压经回授变压器19传送到闸流管栅极电路，使很大的栅极电流经过电容5，此电容就因此充电到电压300伏，而闸流管则完全关闭。因为按钮abc可以由操纵者掌握，使接通时间不超过1秒钟，所以在负载中不会出现第二次脉冲。图1-21为按照本节所载线路装配的引燃断流器外观。

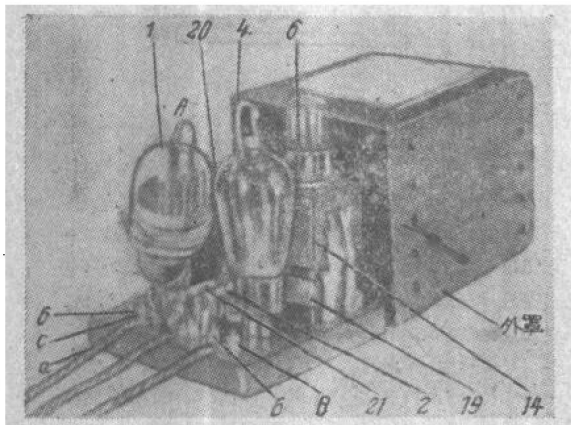


图1-21 引燃装置(断流器)外观，  
标号与图20相同。

3) 剩磁的利用 如果未经加热或没有受到猛烈撞击，许多种钢可以把磁化状态保持很长的时间。借助铁磁粉利用剩磁可确定表面缺陷。

剩磁可用米有效地检验用直流电弧焊接的多种锅炉钢板焊缝的缺陷。

如所周知，进行手工电弧焊接时，电焊条有时会粘着材料；由于强电流通过焊缝，使零件磁化。使用设备时常常要求检查焊缝中是否有细小裂缝。因之，如果焊缝用直流电焊接，那末，焊后甚至经过一两年再来检查这些焊缝也不须进行重新磁化(如果焊缝未受过高温影响)。

有一个简单的方法可确定未重新磁化是否可能来检查焊缝：将未经磁化的刀片的刃部放

在焊缝处。如果刀刃被吸到材料上，则证明此材料有足够的磁化强度，可用磁粉来显示缺陷。

#### 四、磁化电流值的确定

磁力探伤时的磁化电流值具有重要的意义。当电流很强时，铁磁微粒可以显示出组织的纤维、划痕以及其它同类的假缺陷，此外，磁粉微粒将不均匀地沉积在磁化零件的整个表面上，因而对真正缺陷的检查会有所妨碍。

电流很弱时，可能完全显示不出缺陷。

圆周磁化所必需的电流值，可以根据被检验零件的截面尺寸确定出(1-1)。

用剩磁法检验零件时，电流值可按下式计算：

$$I = 25d \quad (1-1)$$

式中  $I$ ——交流电流值(安培)；

$d$ ——被检验零件直径(毫米)。

必须在施加电流磁场的条件下检验时，磁化电流值等于

$$I = 6d \quad (1-2)$$

如用直流电使零件圆周磁化，则可将按此式求得的电流值降低30~35%。

应当注意到上述两公式的形式很相似，因为要更准确地算出合理磁化电流值，必需考虑到被检验零件材料的磁性。

#### 五、磁粉及其制备

在磁力探伤时，为了保证最大的灵敏度，除了选择足够强的电流外，磁粉的质量也有重要的作用。质量好的磁粉可以用磨得很细的干燥氧化铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ —非磁性变性的氧化铁)粉制成。干燥氧化铁与煤油拌合成糊状后放入金属坩埚或陶瓷坩埚中，坩埚盖上石棉盖并涂上粘土，在温度650~800°C的馬弗炉中焙烧。坩埚盖上留一小孔，用来消除内部压力以及排除煤油燃烧不完全时所生成的大量烟黑。可在通风柜或普通的锻造炉，甚至在蒸汽锅炉的燃烧

室中进行磁粉处理。

排烟终止以后，坩埚尚须在炉中停放20~30分钟，然后取出在空气中冷却。冷却时如果盖上盖，空气中的氧气不易进入，则粉末呈黑色。冷却时如磁粉为空气中的氧所氧化，则呈赭石色。

氧化铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )经这样处理后就成为铁磁粉( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ —磁铁矿)。如果缺乏干燥的粉末状氧化铁，也可用未经煤油拌合的磨碎的浸过油的氧化铁制成。利用密闭燃烧去油而获得的磁铁矿的质量比用干燥氧化铁制成的要差，因为前者被油烟所沾污，用其制成的水悬浮液的质量也低，但仍可用来检查许多零件的缺陷。

制就的磁粉是否合用，可用永久磁铁能否吸引磁粉粒的方法来检查，或依据磁化过的肯定有缺陷的标准试样上微粒的沉积情况而定。

用磁粉制成的悬浮液有两种：1) 油脂—煤油溶的；2) 水溶的。表面髒污的零件，如油中淬火后的零件必须使用油悬浮液来检查。在其他场合水悬浮液的优点比油溶者为多。使用水悬浮液时须将被检查零件表面的油污预先清刷或冲洗干净。

把肥皂放入悬浮液除了起稳定作用外，还可促使磁粉粒与零件更好的粘合。

制取1升水悬浮液可取15~20克的甘油三油脂酸肥皂(олеиновое мыло)在少量温水中稀释。然后在该溶液中撒入50~60克磁粉，并在研钵中将混合物仔细磨碎，最后加入热水达到1升的容积。

没有甘油三油脂酸肥皂时，可用盐析皂、胶皂，甚至普通肥皂代替，但用甘油三油脂酸肥皂制成的悬浮液比较均匀和稳定。

油(煤油)悬浮液可用60%的变压器油或锭子油与40%的煤油混合。100克磁粉可稀释成1升悬浮液●。

## 六、零件在磁力探伤后的退磁

在许多场合下磁力探伤后零件有剩磁。这

是不允许的。例如滚珠轴承环的剩磁在工作时就会吸引铁屑，致使轴承很快磨损。同样，如果发动机曲轴在磁力探伤后没有进行退磁，则细微的金属屑就会粘合在上面。

零件经热处理(加热到居里点以上)后剩磁会消失掉，因之随后施行如此处理的零件就不需要退磁了。

最简单实用的基本的退磁法是将要退磁的零件慢慢地从通交流电的螺管线圈中抽出，或者逐渐地减小直接通过零件的交流电。

可是，由于交流电，甚至一般工业用频率为50周/秒的交流电亦不能深入到金属心部。这种方法只能用于表面退磁方为有效。因此由直流电磁化的零件也必需用直流电退磁。退磁的方法是使电流逐渐下降到零，同时以切换方法改变电流的极性。退磁到何种程度很容易测定，为此须看探伤用的磁粉微粒是否被零件所吸引。磁粉微粒吸引不住，即证明实际上已充分退磁。

## 七、磁粉探伤法显示缺陷的灵敏度

确定磁粉探伤法的使用范围及界限，首先应明确用此种方法当缺陷在零件中处于不同位置时可以发现小到何种程度的表面和表面层下的缺陷。像所有其他检查方法一样，磁粉探伤法也有其自身的灵敏度极限。

磁粉探伤法的灵敏度与许多因素有关，如磁化方法，电流大小，磁化时使用交流电或直流电，缺陷埋藏深度，磁粉粒度大小以及使用的是干粉或悬浮液等。可是对于各种类型零件不可能制定出通用的磁力探伤方法，而其它的物理化学研究方法则有这种可能。

在选择理想的磁力探伤工艺，以解决检查铜零件的各种实际问题时，可从叶列明所做的磁力试验表1-1中[2]得到某些指导。图1-22[2]所列的曲线使我们对于磁粉探伤法的灵敏度

● 制取磁粉的其他方法详见叶列明(Н. И. Еремин)著书[2]。

表 1-1

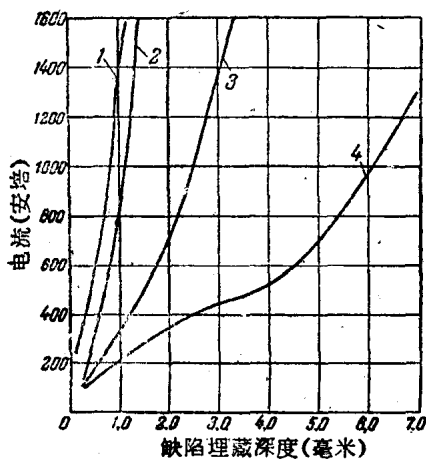
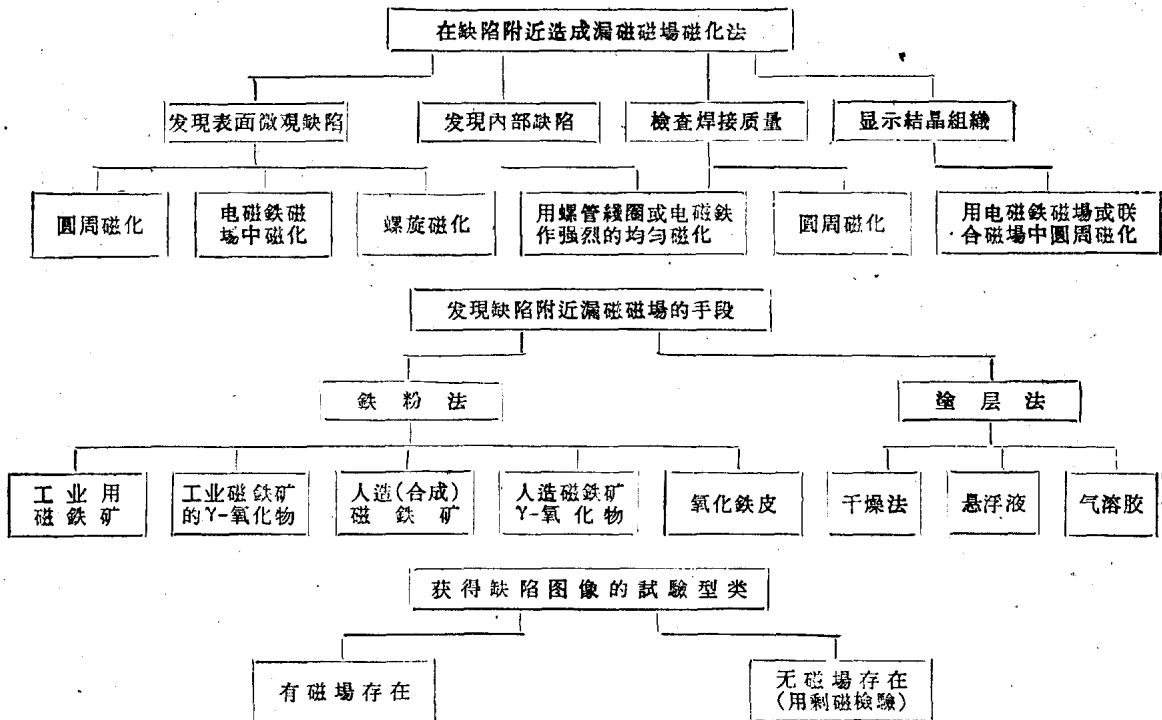


图1-22 直流或交流磁化磁粉

探伤的灵敏度曲线:

- 1—用交流电, 湿法; 2—用交流电, 干法;  
3—用直流电, 湿法; 4—用直流电, 干法。

有一个鲜明的概念。

由曲线可以看出, 直流还是交流磁化, 用干粉还是用悬浮液检验, 对检查表面缺陷不起什么重要作用。可是当检查内部缺陷时, 磁化电流的种类以及试验的方法都有很大的影响。此种情况下直流电比交流电、干粉比悬浮液的优越性就充分显示出来。例如用干粉法检查埋

藏深度 1 毫米的缺陷须用 200 安的直流电。可是在同样情况下用交流电则要约 1000 安, 要大 5 倍。

在同样情况下, 用悬浮液代替干粉时, 直流电流要求为 360 安, 而用交流电则须超过 1600 安。因此检查内部缺陷应该使用干粉法并用直流磁化。这是因为悬浮液具有一定的粘度, 而铁磁微粒在这种粘性介质中移动比在空气中移动要求磁场有较大的作用力。

曲线表明, 用交流磁化并用悬浮液时, 要探明埋藏深度为 1 毫米的缺陷实际上是不可能的, 因为这样需要很大的电流。

图 1-23 所示曲线表明, 缺陷显示的可能性与它们的深度和宽度有关〔2〕。所示曲线亦说明随着缺陷向内部的深入, 磁粉探伤的分辨能力就大大降低。离开表面 15 毫米的缺陷, 如宽度不小于 1 毫米就可以发现, 同样条件下宽度较小的缺陷就完全检查不出。

从图 1-23 所载曲线可推出: 磁力探伤法检查内部缺陷的有效程度远不如其他物理方法, 但是检查表面缺陷时, 却是最好的方法之