

# NB

## 中华人民共和国能源行业标准

NB/T 47013.17—\*\*\*\*

---

### 承压设备无损检测 第 17 部分：磁记忆检测

Nondestructive testing of pressure equipments—  
Part 17: Magnetic memory testing

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

---

国家能源局 发布



# 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 总体要求 .....	3
5 检测方法 .....	5
6 检测报告 .....	8
附录 A (资料性附录) 表面磁场分布标识方法的示例 .....	10

## 前 言

NB/T 47013《承压设备无损检测》分为以下 20 个部分：

- 第 1 部分：通用要求；
- 第 2 部分：射线检测；
- 第 3 部分：超声检测；
- 第 4 部分：磁粉检测；
- 第 5 部分：渗透检测；
- 第 6 部分：涡流检测；
- 第 7 部分：目视检测；
- 第 8 部分：泄漏检测；
- 第 9 部分：声发射检测；
- 第 10 部分：衍射时差法超声检测；
- 第 11 部分：X 射线数字成像检测；
- 第 12 部分：漏磁检测；
- 第 13 部分：脉冲涡流检测；
- 第 14 部分：X 射线计算机辅助成像检测；
- 第 15 部分：相控阵超声检测；
- 第 16 部分：红外热成像检测；
- 第 17 部分：磁记忆检测；
- 第 18 部分：涡流阵列检测；
- 第 19 部分：电磁超声检测；
- 第 20 部分：超声导波检测。

本文件为 NB/T 47013 的第 17 部分：磁记忆检测。

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国锅炉压力容器标准化技术委员会（SAC/TC 262）提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

# 承压设备无损检测 第 17 部分：磁记忆检测

## 1 范围

本文件规定了承压设备磁记忆检测的一般要求、检测程序和结果评定。

本文件适用于铁磁性金属构件（包括焊接接头）的磁记忆检测与评价。通过测量表面磁场指示（磁场强度和磁场方向），评价被检对象微观结构、制造工艺及工作载荷，并可为焊接接头选取其他无损检测方法提供建议。特定条件下，当非铁磁性被检对象存在铁磁相（例如，亚稳态奥氏体钢，氧化皮，涂层）时，可采用磁记忆检测技术进行检测。埋地钢质管道和承压设备有关的支承件和结构件的磁记忆检测，可以参照本部分执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 9445—2015 无损检测 人员资格鉴定与认证(ISO 9712:2012, IDT)

GB/T 12604.10 无损检测 术语 第 10 部分：磁记忆检测

GB/T 20737—2006 无损检测 通用术语和定义(ISO/TS 18173:2005)

GB/T 26641 无损检测 磁记忆检测 总体要求

NB/T 47013.1 承压设备无损检测 第 1 部分：通用要求

NB/T 47013.4 承压设备无损检测 第 4 部分：磁粉检测

DL/T 370-2010 承压设备焊接接头金属磁记忆检测

JB/T 11605 无损检测仪器 金属磁记忆检测仪技术条件

ISO 24497-2: 2020 无损检测 金属磁记忆 焊接接头检测

## 3 术语和定义

GB/T 12604.10、GB/T 20737 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

金属磁记忆 metal magnetic memory

MMM

铁磁性物体在经历磁场变化与磁-机械效应累积作用后的磁状态。

注：在给定的磁场（例如地磁场）下，铁磁物体在其制造过程或运行过程中，由于影响磁畴分布的各种环境因素（例如：温度、机械载荷或材料的微观结构变化），改变了其剩余磁化强度而形成的磁状态。

### 3.2

表面磁场 magnetic stray field

SF

在非主动磁化条件下，磁力线离开和进入工件表面的磁场，表面磁场也称为杂散磁场。

注 1：铁磁材料在其自身体积内和周围空间中都会存在磁场，材料的自磁化场分布在外的表面磁场和在内的退磁场。退磁场和表面磁场是几何相关的，当磁化强度不均匀或存在垂直于表面的退磁场法向分量时，表面磁场就会出现。表面磁场的局部大变化（类似于漏磁）可以表明材料性能的不均匀性。

注2：文献中使用的其他术语是，例如自发漏磁场、残余磁场、表面磁场、漏磁场、磁场密度或表面场。当用于无损检测时，表面磁场是非主动磁化下被动磁场测量的推荐术语，表面磁场是被动磁场测量的推荐术语，而术语漏磁用在检测之前或检测期间主动施加外部磁化以放大磁通量的情况。

### 3.3

金属磁记忆检测 metal magnetic memory testing  
MMM testing

通过测量和分析被检对象表面磁场分布且无需主动磁化的无损检测技术。

磁记忆技术是测量和分析铁磁物体表面磁场分布的技术。其磁场强度可反映铁磁性金属构件（包括焊接接头）的微观结构、制造工艺及工作载荷。检测时应测量被检对象在制造过程中和服役周期内由环境磁场形成的残余磁场所产生的表面磁场。磁记忆检测技术能够检测出表面磁场指示，并对船舶、管道、设备（例如：蒸汽锅炉、汽轮机、热交换器、钢轨）和结构件的焊接接头采取其他无损检测方法提供建议。

磁记忆检测目的：

- 确定铁磁物体磁-机械状态的非均匀性，检测缺陷引起的应力集中程度和金属微观结构不均匀性边界；
- 确定具有表面磁场畸变的位置，以便进一步进行微观结构分析和/或无损检测和评价；
- 被检对象的早期损伤诊断，评价其结构寿命；
- 通过磁性异质性对新的和已使用的检验对象进行快速分类，以进行进一步的检测；
- 磁记忆与其他无损检测方法或技术(超声波检测、X射线检测等)相结合可快速检测出最有可能含有缺陷的位置，从而提高无损检测效率。
- 优化各种类型焊接接头的质量控制及其实施方式(包括接触焊接和点焊焊接)。

注：磁场敏感探头用于测量表面磁场分布。

### 3.4

表面磁场矢量 stray field vector

$H_{SF,i}$

被检对象表面磁场在  $i$  方向 ( $i=x, y, z$ ) 上的分量，其分量幅度与被动式磁敏元件的检测方位有关。

### 3.5

表面磁场指示 stray field indication

SFI

由机械应力/应变区域所诱导的 SF（表面磁场）的畸变。

注1：被检对象表面磁场畸变可能是由应力集中与缺陷（例如裂纹，点蚀），金属组织中强异质的边界，杂质，突然的内部和外部表面几何变化、与被检查物体间的分离、不可逆变形（位错密度高）和化学成分的变化(例如，沉淀或析出)等引起的。

注2：表面磁场指示不一定是缺陷的指示，可能是应力集中区（例如尖角，裂纹尖端）的指示，见附录 A。这需要进一步根据检测实际进行解释和确定。

### 3.6

表面磁场梯度 stray field gradient

$K_{SF}$

同一探头测量的表面磁场随探头位置变化或时间变化的变化率。

注：表面磁场梯度， $K_{SF,i}^j$ ，根据公式(2)和/或公式(3)计算。

## 3.7

表面磁场平均梯度中值 median stray field gradient

$K_{med}$

根据公式(4)计算的测量线和/或测量线之间表面磁场 SF 梯度的平均斜率。

注 1: 它与被检对象的形状各向异性及其磁极化有关。如果被检对象初始工作状态的磁化状态未知, 则表面磁场梯度中值表征被检对象磁状态的估计值。特别是 SF 法向分量常显示为正负值之间的特征曲线。

注 2: 周期性( $\Delta t$ 、时间相关)测量和/或被检对象工作条件之间表面磁场梯度中值的变化, 例如, 在役状态和无工作载荷可能与磁-机械效应有关。

## 3.8

磁指数 magnetic index

$m_i^j$

用来评价 SFI 的一个指标, 定义为 SFI 局部梯度与 SFI 平均梯度的比值, 计算方法见公式(6)。

## 3.9

扫查线间距 distance between neighbouring scanning lines

$\Delta y$

两次测量的探头中心点之间的距离和/或两条相邻测量线之间的距离。

注: 此距离影响表面磁场梯度[3.6],  $K_{SF,i}^j$ 。

## 3.10

扫查线采样间距 discrete sampling distance in the scanning line

$\Delta x$

测量表面磁场大小或分量时的两个相邻测量点之间的距离。

注: 此采样距离影响表面磁场梯度[3.6],  $K_{SF,i}^j$ 。

## 3.11

表面磁场图 magnetic stray field diagram

显示表面磁场分布和/或表面磁场梯度(3.6)和/或表面磁场平均梯度(3.7)与扫查路径的关系曲线。

## 3.12

提离 lift-off

被检对象表面与磁探头传感区域中心点之间的距离。

注: 小的提离对 SFI 评价的可靠性至关重要。

## 4 一般要求

## 4.1 检测人员

从事承压设备磁记忆检测的人员应满足以下要求:

a) 符合 GB/T 26641、NB/T 47013.1 的有关规定。

b) 熟悉所使用的磁记忆检测设备、器材。

c) 具备电磁学的基础知识, 并具有一定的金属材料、焊接、热处理及承压设备制造安装等方面的基础知识。

## 4.2 检测设备和器材

## 4.2.1 概述

检测设备包括检测仪器以及与仪器相连接的检测探头、扫查装置、编码器和电缆线等所有物件; 器材是指实现检测功能所需要且不与仪器相连接的其他器件和材料, 包括永磁铁(参考磁场)等。检测设备和器材性能应符合本文件要求, 功能应满足所检测对象的工艺要求。

#### 4.2.2 检测仪器

磁记忆检测仪应满足 GB/T 26641-2021 第 6 章的相关要求，且具备以下功能：

- a) 增益范围应不小于 50dB，检测灵敏度能够满足受检工件材料的检测要求；
- b) 信号显示方式应具有时基/阴影/数字/叠合等可选方式；
- c) 可将当前信号与先前存储的参考信号进行对比。

#### 4.2.3 检测探头

应根据受检对象及检测要求，选取相应的磁记忆检测探头（包括单通道检测探头、多通道检测探头），且应满足 GB/T 26641-2021 第 6 章的相关要求，且还要求如下：

- a) 在投入使用前均应编号；
- b) 探头检测面宜安装有保护层（耐磨胶带或普通胶带），减少磨损。

#### 4.2.4 扫查装置和编码器

为实现机械扫查并确保探头运动轨迹与参考线保持一致，宜采用扫查装置；为了准确评估受检件的应力状态，应使用编码器。

扫查装置一般包括探头夹持部分、驱动部分、导向部分及位置传感器，其中探头夹持部分应能调整和设置探头位置；驱动部分可以采用马达或人工驱动；导向部分应能在扫查时使探头运动方向与设定方向保持一致。

#### 4.2.5 参考磁场

参考磁场可采用地磁场、永磁铁或标准磁场，用于对磁记忆检测系统进行参数设定和校验。

#### 4.2.6 以下设备因素影响表面磁场测量：

- a) 探头从被检对象表面脱离；
- b) 沿被检对象表面扫查时的探头采样率；
- c) 探头灵敏度；
- d) 探头尺寸；
- e) 与被检对象有关的探头敏感方向；探头敏感方向相对于被检对象的对准度
- f) 探头相对于外部场源(例如：地球的磁场)的方向。

### 4.3 检测工艺文件

#### 4.3.1 检测工艺文件包括工艺规程和操作指导书。

#### 4.3.2 工艺规程除满足 NB/T47013.1 的要求外，至少还应包括：

- a) 检测仪器设备：仪器主机、探头、检测数据采集和分析软件等
- b) 被检产品信息及检测前的准备要求；
- c) 检测覆盖范围及传感器阵列确定；
- d) 被检件表面状态及传感器安装方式；
- e) 检测过程和数据分析解释；
- f) 检测结果的评定；

#### 4.3.3 工艺规程应规定以下所列相关因素的具体范围或要求，当相关因素的一项或几项发生变化并超出规定时，应重新编制或修订工艺规程。

- a) 检测仪器设备：仪器主机、探头、检测数据采集和分析软件等；
- b) 被检产品信息：材质；
- c) 检测覆盖范围及探头阵列确定；



- d) 被检件表面状态及传感器安装方式;
- e) 扫查方向、扫查速度;

4.3.4 应根据工艺规程的内容以及被检产品的要求编制操作指导书。操作指导书除满足 NB/T47013.1 的要求外, 至少还应包括:

- a) 被检对象: 计划形状与尺寸、设计与运行参数、表面状态;
- b) 仪器核查要求;
- c) 探头数量、型号和规格;
- d) 提离;
- e) 扫查方向、扫查速度。

#### 4.4 检测对象

4.4.1 被检测的设备和结构宜在在役状态(载荷作用下)和维护状态(工作载荷去除后)进行磁记忆检测。如有可能, 宜获取被检对象的初始磁状态。

4.4.2 被检对象的表面预处理。宜去除绝缘覆盖层以减少探头的提离, 以提高检测的可靠性和避免绝缘层导致的表面磁场指示。在特殊情况下, 在检测时可允许非磁性绝缘。应对所有允许的绝缘层进行实验验证, 验证结果应附在检测报告里。

4.4.3 检测时, 被检件温度应在检测人员正常和安全的工作范围内。

4.4.4 应用磁记忆检测的限制因素包括以下内容:

- a) 被检对象的消磁和人为磁化;
- b) 被检对象附近、受检区域附近的外部电磁场;
- c) 温度变化可影响检测结果(例如, 交变的环境温度、温升至居里温度);
- d) 探头到被检对象表面距离(提离)及其在测量过程中的变化。

4.4.5 在处理检测结果时宜考虑被检对象由于较大温度变化导致的热剩磁的变化。

4.4.6 影响被检对象的表面磁场指示包括以下因素: 所有因素都可能影响表面磁场指示的评价, 因此在表面磁场指示评价中宜考虑到这些因素:

- a) 被检对象的形状和几何结构(被检对象的几何变化和边缘)是表面磁场的来源, 表面几何结构是强局部表面磁和退磁场的来源;
- b) 较高的应力梯度;
- c) 非均匀塑性变形的边界;
- d) 微观结构的变化;
- e) 外部磁场, 例如:(焊接)被检对象的电流流动, 靠近被检区域的强磁场和非均匀磁场;
- f) 被检对象表面和被检区域附近的铁磁性异物;
- g) 历史磁场引起的局部“人工”磁化;
- h) 具有不同磁性的第二相;
- i) 温度变化。

上述所有因素都可影响表面磁场指示的评价, 因此在表面磁场指示评价中宜考虑到这些因素。

#### 4.5 检测场所和环境

应符合 NB/T 47013.1 的规定。

#### 4.6 安全要求

4.6.1 应符合 GB/T 26641 的规定。

4.6.2 本部分没有完全列出进行检测时所有的安全要求,使用本部分的用户有义务在检测前建立适当的安全和健康准则。

## 5 检测程序

### 5.1 检测前的准备

#### 5.1.1 检测准备程序应包括以下基本步骤:

- a) 分析被检对象的技术文件,编制检测进度图表(检测计划,被检对象日志文件的准备);
- b) 探头和设备的选择;
- c) 准备书面检测程序;
- d) 根据书面操作指南设置和校准仪器与探头;
- e) 被检对象分为单独的检查区域和检查单元,并在被检对象日志文件中标注。

#### 5.1.2 被检对象的技术文件分析包括以下内容:

- a) 有关材料等级和选定检查区域的尺寸和位置的信息;
- b) 分析被检对象的操作模式和可能出现故障(损伤)的原因;
- c) 被检对象的表面条件(例如:氧化皮、抛光、腐蚀、油漆);
- d) 被检对象的几何形状、焊接接头的设计和位置。

#### 5.1.3 现场勘察

对被检对象周围环境进行现场勘查,找出并设法消除可能影响检测结果的因素。同时,对被检工件进行定位标识。

#### 5.1.4 检测条件确定

被检对象表面应无影响检测的障碍物和干扰检测的异物,影响检测的毛刺和氧化皮等必须清除,以确保检测正常进行。

## 5.2 检测步骤

### 5.2.1 检测

通常被检对象的磁化状态强度未知。应沿被检对象表面进行连续或离散扫查来测量表面磁场的三个笛卡尔分量。探头测量的表面磁场分量应与扫查方向一致,探头应对准与笛卡尔坐标方向一致的扫查方向,否则,应将其记录在检测报告中。

在检测过程中,不应改变被检对象相对于外部磁场的位置。被检对象的表面应规划有密集的测量线网格。应测定并记录被检测对象表面上  $H_{SF,i}$  变化的极值位置。

表面磁场的测量结果的模  $\|H_{SF}\|$  (单位为 A / m) 根据公式 (1) 计算:

$$\|H_{SF}\| = \sqrt{H_{SF,x}^2 + H_{SF,y}^2 + H_{SF,z}^2} \quad (1)$$

式中:

$H_{SF,x}$  和  $H_{SF,y}$ ——平行于被检对象表面的两个相互垂直的表面磁场切向分量

$H_{SF,z}$ ——垂直于被检对象表面的表面磁场法向分量

如果在整个测量线上表面磁场的某一切向分量与外部磁场(例如,地球的磁场)难以区分,或者接近于零,则难以检测出与该方向正交的二维不连续性(例如,裂纹)。

注:在地球磁场中旋转被检对象可将切向表面磁场值提供零补偿。

如果被检对象表面磁场的主方向不平行于测量线,则应重新沿该方向进行测量。否则,更改基准后,后续评价应在测量线以及沿(内部)场的主方向之间计算。定期测量表面磁场旋转方向可指

示磁机械效应。

如果运行中的被检对象是磁路的一部分（与其他铁磁物体接触），当移除其他铁磁物品进行检测时，应考虑被检对象中的附加退磁场。如果将被检对象从其操作位置移开，则应确定并记录操作位置和检测位置的磁场。

### 5.2.2 表面磁场梯度的计算

表面磁场指示的定性评价采用梯度  $K_{SF,i}^j$ （单位： $A/m^2$ ）。梯度值表示表面磁场  $H_{SF}$  在  $j$ （ $j = x, y, z$ ）方向的变化量，用公式（2）计算：

$$K_{SF}^j = \frac{\Delta H_{SF,j}}{\Delta d} = \frac{dH_{SF,j}}{dx} \text{ 或 } \frac{dH_{SF,j}}{dy} \quad (2)$$

或根据公式（3）分别计算每个磁场分量  $i$ （ $i = x, y, z$ ）

$$K_{SF,i}^j = \frac{\Delta H_{SF,i}}{\Delta d} = \frac{dH_{SF,i}}{dx} \text{ 或 } \frac{dH_{SF,i}}{dy} \quad (3)$$

式中：

$\Delta H_{SF,i}$ ——两个相邻扫查点之间的  $H_{SF,i}$  场之差；

$\Delta d$ ——两个相邻点之间的距离 [在扫查线中（ $\Delta d = \Delta x$ ）或在相邻线之间（ $\Delta d = \Delta y$ ）]；

$i$ ——磁场分量，计算梯度的磁场分量  $H_{SF,i}$ （ $i = x, y, z$ ）；

$j$ ——空间方向，计算梯度空间方向，（ $j = x, y, z$ ）。

应在被检对象的（ $x, y$ ）平面的两个方向上计算所有测得的磁场分量（ $x, y, z$ ）的梯度。

如有可能，应将  $K(t+\Delta t)_{SF,i}$  值与先前（时间， $t$ ）的测量结果  $K(t)_{SF,i}$  进行比较。

### 5.2.3 表面磁场指示的评价基准

法线和/或切线分量的值  $K_{SF,i}^j$  即为表面磁场指示。对于在被检对象上发现的所有表面磁场指示，均应计算该区间的所有法向和切向分量的梯度中值  $K_{med,i}^j$ 。对于  $K_{SF,i}^j$  和  $K_{med,i}^j$ （单位： $A/m^2$ ）（见公式 4），均宜避免边缘效应和几何形状变化。

$$K_{med,i}^j = \text{median}(K_{SF,i}^j) \quad (4)$$

### 5.2.4 表面磁场指示的位置

如果某一点处存在至少一个较高幅值的表面磁场切向分量，则该点处的表面磁场法向分量的梯度中值为表面磁场指示。

### 5.2.5 表面磁场指示的计算

表面磁场指示根据公式（5）计算：

$$K_{SF,i}^j > K_{med,i}^j \quad (5)$$

### 5.2.6 磁指数的计算

确定了  $K_{med,i}^j$  后，并对所有  $K_{SF,i}^j$  值按照公式（6）计算磁指数  $m_i^j$ ：

$$m_i^j = \frac{K_{SF,i}^j}{K_{med,i}^j} \quad (6)$$

在每个方向（ $i = x, y, z$ ）上分别计算表面磁场  $j$ （ $j = x, y$ ）分量的  $m_i^j$  和  $K_{SF,i}^j$  数值。如果磁指数  $m_i^j$  超过预先定义的阈值  $m_{lim,i}^j$ ，则可做出被检测物体材料状态的推论。

注：梯度和磁指数需要根据不同的仪器设置不同的数值。将一种仪器上的设置转换为另一种类型的设置是不合理的。即使同一个制造商的同一款仪器，当检测到相同的表面磁场指示或不连续性时，梯度和阈值也可能存在变化。因此，过分强调梯度和阈值的数值是不合理的。被检对象的磁指数阈值  $m_{lim}$  可通过对相同的材料、形状和生产工艺的工件采用其他无损检测或者破坏性试验确定缺陷或工件的运行极限而获得。否则  $m_{lim} = 1$ ，且每个  $K_{SF, i} > K_{med, i}$  都是表面磁场指示。

#### 5.2.7

为对被检测物体进行验证评价，宜将检测数据可视化，如可能，其图像应附在检测报告中。

#### 5.2.8

当被检对象仍在役运行时，应对检测出的表面磁场指示的每个区域进行其他无损检测。按此可对最具代表性的区域进行进一步的分析。

### 5.3 检测结果验证

应对有表面磁场指示的每个区域采用 NB/T47013.4 等规定的无损检测方法进行验证。

## 6 检测报告

6.1 应在检测报告中明确说明和记录检测系统与探头的工作原理、处理、校准、工作范围和限制条件及探头的类型、尺寸和设置。检测报告应记录检测结果，报告至少应包含以下数据：

- a) 检测机构名称、发现表面磁场指示的被检对象部位的名称；
- b) 含位置信息的较高表面磁场  $H_{SF}$  值，及表面磁场梯度  $K_{SF}$  的极值，作为表面磁场指示及其评价结果；
- c) 目视检测结果；
- d) 阈值  $m_{lim} \neq 1$  时，确定阈值  $m_{lim}$  的程序及其值；
- e) 使用其他无损检测方法对表面磁场指示位置进行附加检测结果（如果有）；
- f) 被检对象从初始使用开始的无故障运行时间（如果已知）；
- g) 检测参数：探头设置、探头相对于被检对象表面和测量方向的夹角、探头速度、探头提高、相邻测量点之间的距离  $\Delta d$  等；
- h) 外部磁场（例如：地磁场） $H_0$  相对于测量线的方向；
- i) 磁记忆检测所用设备的信息（品牌和序列号、探头类型和尺寸、灵敏度、磁强计/梯度计等）；
- j) 被检对象的最终验收要求；
- k) 检测的地点、条件、检测日期、检测人员的姓名和签名。

6.2 应在报告中附上表面磁场图（和/或映射图）和被检对象的日志文件，以说明检测区域和检测到的表面磁场指示。

6.3 应根据获得的检测结果分析被检对象的状态。

6.4 检测报告应至少保存到下一次被检对象检测。

## 附录 A

(资料性附录)

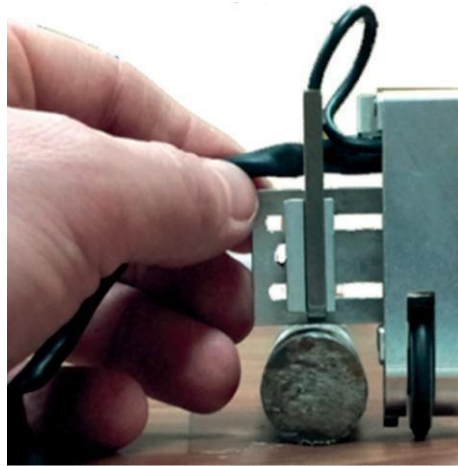
## 表面磁场分布标识方法的示例

用于制造离心泵轴的直径为 22mm 钢棒的磁记忆检测结果，见图 A.1。

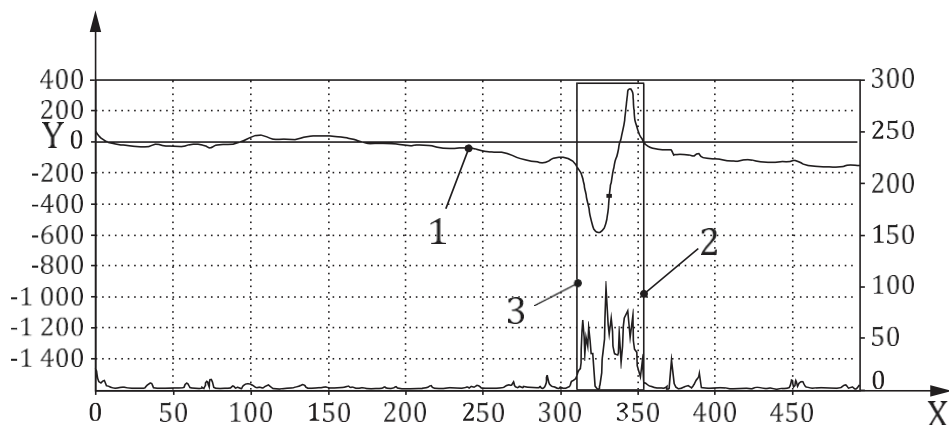
钢棒检测过程中扫查装置的示意图，见图 A.1 a)。

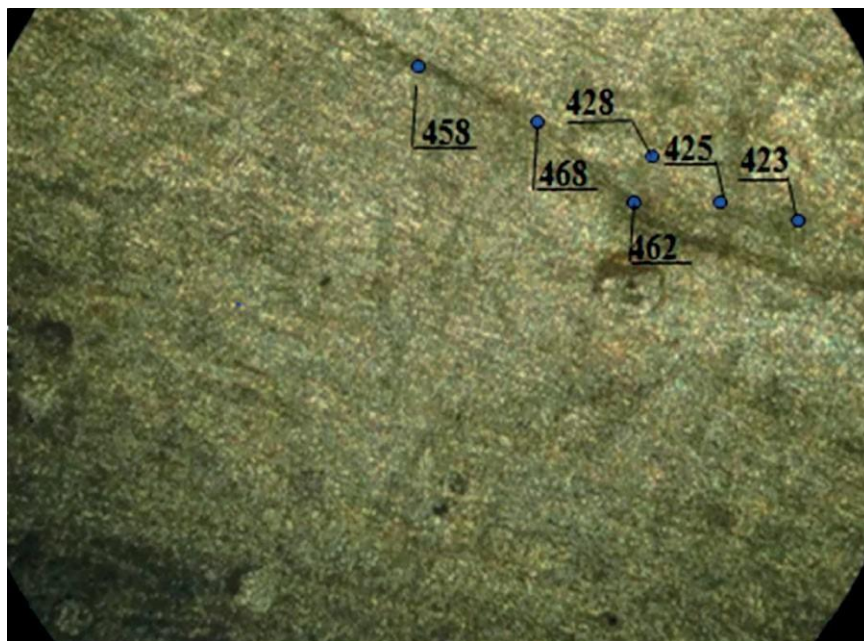
表面磁场的法向分量  $H_{SF,z}(x)$  (1)及其表面磁场梯度模量  $K^x_{SF,z} = |dH_{SF,z}/dx|$  (2)沿棒的  $x$  轴的分布，见图 A.1 b)。区域 (3) 中的表面磁场指示，显示了正常部位和畸变部位梯度模量差异。

钢棒横截面的显微照片，见图 A.1 c)。与相邻材料相比，线型结构的硬度值（内嵌图中的值）的增加表明存在冶金缺陷，与图 A.1 b) (3) 区域中的表面磁场指示一致，在 ISO 24497 系列标准中，表面磁场指示  $SFI$  也被称为应力集中区 (SCZ)。



a) 棒检测过程中扫查装置的示意图

b) 表面磁场法向分量  $H_{SF,z}(x)$ 及其梯度模量  $K^x_{SF,z} = |dH_{SF,z}/dx|$ 的分布，表明存在 SFI



c) 与图 A.1 b) 区域 (3) 中 *SFI* 相对应的棒横截面显微照片

标引序号说明:

- 1——表面磁场法向分量  $H_{SF,z}(x)$  ( $\times A/m$ , 左垂直刻度) 沿  $x$  轴的分布 (底部水平刻度  $X$ , mm) ;
  - 2——梯度值  $K^x_{SF,z} = |dH_{SF,z}/dx|$  ( $\times 10^3 A/m^2$ ) 右垂直比例尺) 沿  $x$  轴的分布 (底部水平比例尺  $X$ , mm) ;
  - 3——局部图, 图中表面磁场法向分量  $H_{SF,z}(x)$  及其梯度值  $K^x_{SF,z} = |dH_{SF,z}/dx|$ , 与 *SFI* 有关;
- 458, 468, 462——冶金缺陷区域的维氏硬度 (HV2) 值;
- 428、425、423——邻近冶金缺陷的区域的维氏硬度 (HV2) 值。

图 A.1 直径为 22mm 棒的磁记忆检测装置和结果