

浅析无损检测中的磁粉检测技术

董俊峰

内蒙古自治区特种设备检验研究院通辽分院，内蒙古通辽市，028000；

摘要：无损检测技术是指在不损害被检测对象性能和内部组织的前提下，通过检测对象内部的结构变化或者缺陷引起的声、光、电、磁等反映变化，利用现代化的技术手段、借助科学的检测设备来对被检测对象的表面或者内部的结构、特点以及缺陷的类型、种类、分布、数量和形状等进行检测的方法。磁粉检测是目前无损检测常用的检测方法之一，该方法在无损检测中已经有了上百年的历史，随着现代无损检测方法的进步，磁粉检测方法也有了明显的改进。本文对磁粉检测法的分类和磁粉的种类以及磁化的方式等进行了介绍，阐明了磁粉检测技术是无损检测的重要方法。

关键词：无损检测；磁粉检测；技术

DOI：10.69979/3041-0673.26.01.038

现阶段无损检测技术方法很多，而磁粉检测是目前比较成熟的检测方法之一，利用磁粉检测几乎包含了航空、铁路以及机械等各个领域，是一种通过磁现象来检测铁磁材料表面裂纹和其他缺陷的一种检测技术。由于磁粉检测技术直观便利、而且成本低廉，很多仪器设备都能用来进行检测，因此在无损检测中得到了广泛的应用。

1 磁粉检测技术概况

1. 磁粉检测定义。磁粉检测是一种针对铁磁性材料（如铁、钴、镍及其合金）及其构件进行无损检测的常规方法。它的核心原理是利用材料自身的铁磁性：

磁化：对被检工件施加磁场（使其磁化）。**缺陷漏磁场：**如果工件表面或近表面存在不连续性（如裂纹、折叠、夹渣、气孔等缺陷），这些缺陷会阻碍磁力线的顺利通过，导致磁力线在缺陷处发生畸变，部分磁力线会泄漏出工件表面，形成所谓的漏磁场。**磁粉聚集显示：**在工件表面撒布（干法）或喷洒（湿法）细微的磁性颗粒（磁粉）。这些磁粉会被漏磁场吸附，在缺陷处聚集形成肉眼可见的磁痕（堆积显示）。**观察与分析：**检测人员通过直接目视（通常在适当光照下，有时借助辅助照明工具）或荧光磁粉在黑光灯（紫外线）下观察这些清晰的磁痕显示，从而判断缺陷的位置、大小和形状。**关键要素总结：**目标材料：仅限于铁磁性材料。检测对象：表面和近表面开口的不连续性缺陷（通常埋藏深度不超过几毫米）。物理基础：利用磁场和漏磁场现象。显示介质：磁粉（干粉或悬浮液）。检测结果：可视的磁痕（磁粉堆积）。主要优点：检测速度快、灵敏度高

（对细小裂纹非常有效）、操作相对简单、结果直观可见、成本相对较低。主要局限：仅适用于铁磁性材料；通常只能检测表面和近表面缺陷；需要对工件进行磁化；可能需要退磁；检测后需要清洁工件。

2. 磁粉检测原理。磁粉检测的原理基于铁磁性材料磁化后缺陷处产生的漏磁场对磁粉的吸附作用，形成可见磁痕以显示缺陷，具体过程如下：核心原理步骤，工件磁化，对铁磁性材料施加磁场使其磁化。若无缺陷，内部磁力线均匀分布；若存在表面或近表面缺陷（如裂纹、夹杂），磁力线在缺陷处发生畸变，漏磁场形成，缺陷破坏了材料的连续性，导致部分磁力线溢出工件表面，在缺陷区域形成局部漏磁场（即N/S磁极）。磁粉聚集显像，在工件表面施加磁粉（干粉或悬浮液），漏磁场吸附磁粉并堆积成与缺陷形状一致的磁痕。磁痕观察，在自然光（非荧光磁粉）或紫外光（荧光磁粉）下观察磁痕，确定缺陷位置、尺寸和形态。

2 磁粉检测方法类型特点

1. 检测方法分类。（1）按磁化时机，连续法，在外加磁场作用的同时施加磁粉或磁悬液，适用于低碳钢、大型构件或退火态材料，灵敏度高且可实时观察磁痕。剩磁法，磁化后撤除外磁场，利用工件剩磁吸附磁粉；仅适用于剩余磁感应强度 $\geq 0.8T$ 、矫顽力 $\geq 800A/m$ 的高碳钢或合金钢。（2）按磁粉载体状态，湿法，磁粉悬浮于油、水等载液中形成磁悬液，均匀覆盖工件表面，灵敏度高（可检出 $0.1\mu m$ 级缺陷），适用于光滑表面或微小裂纹检测（如疲劳裂纹）。干法，

直接喷洒干磁粉于工件表面，适用于高温、粗糙表

面(如铸件毛坯)或局部检测,操作简便但易扬尘且灵敏度较低。(3)按磁粉显示特性,荧光磁粉法,需紫外线激发(波长365nm),在暗环境下显示黄绿色磁痕,灵敏度最高(可识别0.05mm深裂纹),用于精密部件检测。非荧光磁粉法,依赖可见光观察,按工件表面颜色选用黑、红、白等对比色磁粉(如黑色用于浅色工件)。

2. 磁化方法分类。(1)周向磁化,原理:产生环绕工件的环形磁场,检测轴向裂纹。方法:轴向通电法:电流沿工件轴向通过,适用实心轴类、管材,但接触不良可能电击工件。中心导体法:导线穿过空心工件中心,安全无电击伤,可批量检测通孔类工件。(2)纵向磁化,原理:产生平行于工件轴线的磁场,检测周向裂纹。方法:线圈法:工件置于线圈内磁化,适合长轴类部件。磁轭法:便携式电磁轭局部磁化,有效区域为两极连线±50mm,需多次调整方向覆盖全表面。(3)复合磁化,同时施加周向与纵向磁场(如交叉磁轭法),一次性检测多方向缺陷,效率高但设备复杂。

3 磁粉检测关键参数影响因素

磁粉检测(MT)的关键参数直接影响检测灵敏度与可靠性,主要影响因素可分为磁场参数、材料特性、磁粉性能及操作条件四类,具体如下:

1. 磁场参数。磁场强度与方向,磁场强度需达到材料饱和磁感应强度的80%~90%(如低碳钢约1.2T),过低则漏磁场不足,过高易产生伪磁痕。缺陷方向与磁力线夹角 $\geq 45^\circ$ (最佳垂直),平行时漏磁场趋近于零,导致漏检。磁化电流类型,交流电:对表面缺陷灵敏度高(集肤效应),但近表面缺陷检出能力弱。直流电:能检测近表面较深缺陷(深度 $\leq 5\text{mm}$),但对表面微裂纹灵敏度较低。磁化方法选择,周向磁化(通电法/中心导体法)检测轴向裂纹,纵向磁化(线圈法/磁轭法)检测周向裂纹;复合磁化可覆盖多方向缺陷。

2. 材料特性。工件磁导率,高磁导率材料(如纯铁)漏磁场更强,灵敏度更高;低磁导率材料(如高碳钢)需增强磁场。表面状态,粗糙表面($R_a > 25\ \mu\text{m}$)、油污或涂层(厚度 $> 0.05\text{mm}$)会阻碍磁粉移动,掩盖真实缺陷。缺陷性质,深宽比大的裂纹(如淬火裂纹)漏磁场显著,易检出;气孔类缺陷检出率较低。缺陷埋藏深度 $> 5\text{mm}$ 时,漏磁场急剧减弱,难以检测。

3. 磁粉与磁悬液参数。磁粉性能,粒度:细粒度磁粉($1\text{--}10\ \mu\text{m}$)灵敏度高,适用于湿法检测微裂纹;粗

粒度($50\text{--}150\ \mu\text{m}$)适用于干法检测大缺陷。磁性:高磁导率、低剩磁磁粉易被微弱漏磁场吸附。颜色对比:荧光磁粉(紫外光下显像)灵敏度比非荧光磁粉高30%。磁悬液浓度,水基悬液浓度通常为0.1~0.4ml/100ml,油基为0.3~0.6ml/100ml;浓度过低导致磁痕模糊,过高则背景干扰。

4. 操作条件。光照条件,非荧光磁粉需白光光照度 $\geq 1000\ \text{lx}$;荧光磁粉需紫外光波长365nm,暗室环境照度 $\leq 20\ \text{lx}$ 。磁粉施加时序,连续法:磁化同时施粉,灵敏度高,适用大多数材料;剩磁法:仅适用于高剩磁($\geq 0.8\text{T}$)材料。人员技能,磁化参数设定、磁痕识别能力及标准符合性(如ASTME1444)直接影响结果可靠性。

5. 综合影响与限制。磁场方向偏离,夹角 $< 20^\circ$ 时检出率 $\downarrow 90\%$,需双向磁化覆盖;工件形状,复杂结构(如内孔)易磁化不均,配合中心导体法/多向磁化;设备性能,磁轭提升力不足导致漏检,交流电磁轭 $\geq 45\text{N}$,直流 $\geq 177\text{N}$ 。

4 磁粉检测应用领域实例

磁粉检测在工业领域广泛应用,其应用实例覆盖多个关键行业,具体如下:

1. 航空航天领域。火箭燃料贮箱焊缝检测,检测运载火箭燃料贮箱焊缝中的应力腐蚀裂纹,可识别长度 $\geq 3\text{mm}$ 的缺陷。发动机叶片与起落架,检测飞机发动机叶片疲劳裂纹及起落架表面缺陷,预防高应力部件失效。

2. 轨道交通领域。轮轴与钢轨探伤,采用荧光磁粉检测轮轴表面裂纹,检出率较常规磁粉提高37%;钢轨焊缝疲劳裂纹检测可发现深度 $\geq 0.1\text{mm}$ 的缺陷。转向架部件,检测列车转向架螺栓的纵向裂纹(荧光磁粉法),防止因应力集中导致断裂。

3. 汽车制造领域。发动机部件,发动机缸体淬火裂纹检测,灵敏度达0.05mm深度;曲轴、齿轮表面折叠缺陷识别。传动系统,变速箱齿轮轴近表面夹杂物检测,预防运行中疲劳断裂。

4. 能源与化工领域。压力容器与管道,检测储罐焊缝腐蚀裂纹、阀门密封面缺陷(湿法荧光磁粉),避免高压介质泄漏。风电设备,风电螺栓组件螺纹根部疲劳裂纹检测(荧光磁粉法),发现贯穿性环向裂纹。

5. 机械制造领域。大型锻铸件,锻钢件毛坯表面折叠检测(粗糙表面适用干法磁粉),限定表面粗糙度 R_a

≤25 μm。轴承与齿轮，轴承内圈淬火裂纹检测（荧光磁粉），发现多处纵向裂纹；齿轮磨削裂纹识别。

6. 建筑工程领域。钢结构连接件，桥梁高强螺栓疲劳裂纹检测，磁轭法定位周向缺陷。焊接结构，建筑钢结构焊缝表面气孔、夹杂物检测，预防应力集中失效。特殊场景案例，螺纹根部裂纹检测：石油化工高压螺栓采用专用荧光磁粉工艺，解决第1-3圈螺纹根部疲劳裂纹检出难题（磁悬液浓度0.7-0.8g/L）。高温部件检测：低频磁力探伤仪检测深度达8mm近表面缺陷，无需退磁，适用于无电源环境。

5 磁粉检测实操方法标准

1. 实操流程规范。表面预处理，清除工件表面油污、锈蚀及涂层（残留涂层厚度≤0.05mm时经协商可保留）。打磨粗糙表面至Ra≤25 μm，避免影响磁痕显示。设备校验，磁化设备：磁轭提升力要求：交流电磁轭≥45N，直流电磁轭≥177N（校验周期半年）。交叉磁轭磁极间隙≤1.5mm，移动速度≤4m/min。磁悬液浓度：非荧光磁粉水基液：0.1-0.4ml/100ml，油基液：0.3-0.6ml/100ml。荧光磁粉液：0.2-0.6ml/100ml。灵敏度验证，使用标准试片（A1-15/50或C-15/50型），粘贴于工件关键区域，需显示人工缺陷深度≥30%的清晰磁痕。磁化操作，连续法：磁化同时喷洒磁悬液，通电时间1-3秒，停液≥1秒后停止磁化，重复2次。磁轭法：磁极间距75-200mm，有效检测区域为两极连线±50mm，重叠区域≥15mm。需垂直方向两次磁化（间隔90°）覆盖全向缺陷。磁痕观察，非荧光磁粉：白光下可见光照度≥1000 lx（便携设备≥500 lx）。荧光磁粉：紫外线波长365nm，暗室环境照度≤20 lx，辐照度≥1000 μW/cm²。细小裂纹用2-10倍放大镜复核。退磁与清理，剩磁需≤0.3mT（240A/m）；清除残留磁粉，避免干扰后续工序。

2. 核心执行标准。ASTM E1444，规定磁化方法、设备校验、磁粉性能及验收准则，要求每日用试片验证系

统灵敏度，国际通用（机械/航空航天）；NB/T 47013.4，明确荧光法仅限湿法，优先用于高强度钢/应力腐蚀部件，禁用奥氏体钢检测，国内承压设备（压力容器/管道）；GB/T 9444，铸钢件磁粉检测流程及质量分级（裂纹/白点零容忍，线性缺陷按长度分级），铸锻件毛坯；JB/T 4730.4，磁悬液润湿性检验要求，缺陷记录需标注位置/尺寸，并区分相关/非相关显示，通用工业设备。

3. 特殊工况处理。螺纹根部检测：采用专用荧光磁悬液（浓度0.7-0.8g/L），磁化方向平行于螺纹轴线。高温部件：低频磁力探伤仪穿透深度达8mm，适用于无电源环境。复合磁化：交叉磁轭一次性检测多向缺陷，但需严格控制移动速度与间隙。

总之，对于被检测材料进行磁粉无损检测是无损检测技术中的常用的方法之一，只有确保被检测材料的正常才能进行设备的生产和组装，同时对于无损检测技术人员也要具有一定的专业资质和经验，确保无损检测结果的准确性。

参考文献

- [1] 邱瑞. 磁粉检测在压力容器检验中的应用研究[J]. 福建冶金, 2020, 49(6): 55-56.
- [2] 张郡芳. 磁粉检测技术在在役压力容器检验中的应用[J]. 石油化工设备, 2021, 40(S2): 34-36.
- [3] 林丰来. 带涂层压力容器的磁粉检测[J]. 中国特种设备安全, 2020, 26(11): 40-42.
- [4] 柳幼旭. 用荧光磁粉检测重要压力容器的表面缺陷[J]. 压力容器, 2024(8): 49-50, 4.
- [5] 霍泽. 罐体裂纹磁粉检测图像处理技术研究[J]. 机械工程与自动化, 2019(5): 167-168, 171.
- [6] 李东. 简述压力容器磁粉检测常见的几个问题[J]. 中国标准化, 2022(16): 189-190.
- [7] 金芳峥. 高温磁粉检测在压力容器制造中的应用[J]. 石油化工设备, 2022, 41(S1): 48-50.