

# 石油管材表面缺陷检测技术研究

张应骏（陕西九州石油工程技术服务有限责任公司，陕西 西安 710000）

全 珂（中国石油集团工程材料研究院有限公司，陕西 西安 710000）

**摘要：**石油作为工业的血液，在能源结构中所处的位置极高；管材作为开采、运输及加工石油的重要载体，其质量与石油工业运行安全性、经济效益之间密切相关。由于管材所处环境较为恶劣，这也决定了其出现磨损、裂纹等缺陷的可能性较大，只有及时发现并处理缺陷，才能将发生事故的概率降至最低。文章以管材表面检测为落脚点，介绍了现有检测技术的原理和适用情况，具体包括光学、电磁及超声波检测，在此基础上，结合实例对电磁检测这一技术的实际应用进行了说明，以供参考。

**关键词：**检测技术；表面缺陷；石油管材

中图分类号：TE973.6 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)021-0160-03

## Research on Surface Defect Detection Technologies for Petroleum Tubular Goods

Zhang Yingjun (Shaanxi Jiuzhou Petroleum Engineering Technology Service Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710000, China)

Tong Ke (China Petroleum Engineering Materials Research Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710000, China)

**Abstract:** Petroleum, as the lifeblood of industry, occupies a very high position in the energy structure; As an important carrier for the extraction, transportation, and processing of petroleum, the quality of pipes is closely related to the operational safety and economic benefits of the petroleum industry. Due to the harsh environment in which the pipes are located, there is a high likelihood of wear, cracks, and other defects occurring. Only by promptly detecting and addressing these defects can the probability of accidents be minimized. The article focuses on the surface inspection of pipes and introduces the principles and applicability of existing inspection technologies, including optical, electromagnetic, and ultrasonic inspections. Based on this, practical applications of electromagnetic inspection technology are illustrated with examples for reference.

**Keywords:** detection technology; Surface defects; OCTG

石油管材在石油开采、运输过程中发挥着无法被替代的作用，由于需要长期暴露在较为恶劣的环境中且运输物质的侵蚀性较强，因此，石油管材表面极易产生凹坑、裂纹等缺陷，上述缺陷不仅会影响管材的寿命，还会加大泄漏等安全事故发生的可能性，使环境、人类安全受到威胁。由此可见，检测管材表面缺陷的工作极具现实意义，以既有检测技术为基础，结合工作需要开发或引入精度更高、速度更快的技术，对提高管材安全性、可靠性十分重要。

### 1 缺陷检测技术说明

#### 1.1 光学检测

光学检测在检测管材表面缺陷的工作中扮演着重要角色，要想最大化实现光学检测系统的价值，不仅要准确理解成像原理，还要针对实际操作可能遇到的挑战制定应对方案。例如，检测人员可以引入高灵敏度的CCD配合定制镜头，精确捕捉微小缺陷，使分辨率维持在 $\mu\text{m}$ 级别，为检测结果的准确性提供保障。现有检测系统已经具备识别0.1mm以内微小缺陷的功能，相比于目视检查，检测效率提升了50%左右，不仅检测速度有所提高，漏检的可能性也显著降低。要

想进一步增强系统的实效性，可以有针对性地引入机器学习、深度学习算法，通过大量具有实际意义的缺陷样本训练模型，使得系统能够自动、准确地识别常见的表面缺陷模式，通过提高检测的自动化程度，确保其即使面对非典型的缺陷，仍然可以在较短的时间内作出判断<sup>[1]</sup>。这里要明确一点，即无论是设计、优化还是使用光学检测系统均需要考虑诸多因素，例如，设备成本、检测效率，因此，检测人员需要结合成本效益，对最佳优化策略加以确定，配合定期的校准和维护工作，使系统的价值得到最大化实现。

#### 1.2 电磁检测

##### 1.2.1 检测原理

电磁感应揭示了变化的磁场如何在导体中产生电动势、引发电流，将该原理用于管材检测，可以使检测工作的实效性得到增强，这是因为管材在匀速通过产生交变磁场的线圈时，涡流会产生与磁场方向相反的磁场，若管材存在裂纹、凹坑或腐蚀等缺陷，涡流将无法正常流动，其产生的磁场也会改变<sup>[2]</sup>。检测人员可以通过精密的传感器、先进的信号处理技术，准确检测磁场变化，进而确定管材的缺陷位置和严重程

度。以涡流检测为代表的检测技术，凭借其非接触、高速和高灵敏度的特点，在检测石油管材的领域得到了广泛应用，优化检测系统的频率及线圈设计，可以使检测裂纹的精度稳定在0.1mm。除此之外，涡流检测在区分表面、近表面缺陷方面同样有突出的表现，将其用于石油管材的检测，不仅有助于检测人员判断管材的完整性，还能够为预测管材的寿命提供参考。

### 1.2.2 技术介绍

磁粉检测作为典型的电磁检测技术，强调利用磁场和磁性材料的特性，通过检测管材表面磁场的变化，判断石油管材是否存在质量缺陷。如果经过磁化处理的管材表面有凹坑、裂纹等缺陷，磁力线会在缺陷处发生畸变，致使大量磁粉在缺陷上方聚集，为检测人员了解缺陷位置、大小提供参考。涡流检测在缺陷识别、评估方面同样具有独特的优势，该技术的原理是通过在管材表面产生涡流的方式，判断是否存在缺陷。具体来说，就是运用涡流检测在管材表面附近产生交变磁场，使管材内部产生涡流，管材表面存在质量缺陷时，涡流的强度、分布会受涡流影响而发生变化，此时，可以根据检测线圈对应的感应电压，确定管材缺陷<sup>[3]</sup>。此技术在检测金属材料表面、近表面是否存在缺陷方面具有极为突出的灵敏度，同时还具有检测速度快的优点，可以使在线检测的设想成为现实。实践经验表明，使用检测频率、线圈经过优化设计的涡流检测技术，对石油管材质量进行检测，可将误报率维持在2%以下，检测可靠性、准确性有目共睹。考虑到磁粉检测更适用于表面开口缺陷的检测，涡流检测在检测表面下方一定深度的缺陷方面有更为突出的表现，因此，实际工作中，检测人员可以将二者结合，通过同步检测表面缺陷、近表面缺陷，为管控管材质量提供有力支持。

### 1.3 超声波检测

近几年，超声波检测凭借其非破坏性、高精度和对缺陷的敏感性，在检测管材缺陷的领域得到了大力推广。超声波探头作为检测设备的核心组件，其性能会给检测的准确性和效率产生巨大影响。该探头通常由压电材料制成，可以先将电能转化为机械振动，再产生超声波，对检测石油管材的工作而言，管材的几何形状、材料特性及常见缺陷类型都会影响探头的选择。

科学选择或优化设计检测设备的初衷是提高检测分辨率，依靠高灵敏度的检测，将误报率始终维持在较低水平。检测人员可通过聚焦探头集中超声波束，高效完成检测微小缺陷的工作，或是引入多晶探头，扩大声束的覆盖范围边界，使全面检测管材缺陷的设计成为现实。需要特别提出的是，超声波检测既可以用于外表面检测，又可以用于内表面检测，检测人员可以在探头选型工作结束后，视情况选择检测信号处理算法，一般情况下，超声波检测能够准确发现直径在0.5mm以内的裂纹，在维持管材安全运行方面发挥着重要作用。

将超声波检测用于管材表面检测，不仅体现了技术的个性，同时也标志着石油工业安全的提升。实际工作中，检测人员应根据管材的外观、壁厚及材料，对检测频率、波形加以确定，为检测结果的准确性提供保障。例如，针对表面较为粗糙的管材，检测人员可以选择频率较低的纵波开展检测工作，利用其在管材内部传播距离较远的特点，提高检测深度，确定管材是否存在内部缺陷。如果管材的壁厚较大，则可以通过横波斜射的方式完成检测，这是因为横波对管材内部缺陷的反应更加灵敏，有助于检测人员及时发现裂纹、夹杂物等缺陷。此外，检测人员还应该考虑管材的材料特性，针对不锈钢、合金钢等不同类型的材料，选择最适宜的探头和技术，确保检测工作能够顺利、高效开展。

## 2 石油管材检测实例研究

### 2.1 事故说明

某油田钻井85、86柱连接部位的外螺纹根部出现裂纹，事故发生后，为确保后续作业安全进行，检测人员对该批次的石油管材展开了全面的检测分析。通过对裂纹所在部位展开电磁检测，揭示裂痕产生的原因，为后续的管材选用和质量控制提供科学依据。试样信息如表1所示。

### 2.2 检测分析

试样①的长度在500mm左右，②长600mm，裂纹所在位置和外螺纹台肩面之间的距离在20mm左右。使用电磁检测技术检测试样①剩余螺纹（检测条件如表2所示）发现，试样①外螺纹根部有重复撕裂的裂纹，裂纹长5mm。

表1 试样信息

编号	状态	信息
①	外螺纹根部出现断口的失效钻杆	扣型 DS55；钢级 S135；直径
②	已经投入使用且尚未失效的钻杆	139.7mm

表 2 检测条件

项目	参数	项目	参数
设备	磁轭	型号	CJZ-212E
部位	内表面 + 外表面	磁粉	荧光磁粉
检验方法	湿连续检验	磁化方法	磁轭
磁化标准	提升力不小于 45N	灵敏度试片	标准试片

## 2.3 综合分析

试样①、②的晶粒度、化学成分与要求相符，考虑到试样①的外螺纹接头已经无法正常发挥作用，故决定参考试样②的试验结果得出最终的结论。通过分析现场钻具、钻压可知，导致试样①断裂的原因主要包括弯曲应力、轴向载荷，其中，弯曲应力的产生与钻柱、井眼弯曲有关，拉伸载荷的产生则与钻柱自重有关。对需要同时承受拉力作用、扭矩作用的钻杆而言，其抗扭强度可按下式（1）计算：

$$Q_T = \frac{0.096167J}{D} \sqrt{Y_m^2 - \frac{P^2}{A^2}} \quad (1)$$

式中： $Q_T$ 是指拉应力作用下，抗扭强度的最小值，单位  $ft \cdot lbf$ ； $J$ 是指极惯性矩，取 0.098175，单位  $D^4 - d^4$ ； $D$ 是指直径，单位  $in$ ； $Y_m$ 是指材料屈服强度最小值，单位  $lbf/in^2$ ； $P$ 是指拉伸载荷总值，单位  $lbf$ ； $A$ 是指横截面积，单位  $in^2$ 。计算结果如表 3 所示：

表 3 钻杆抗扭强度

参数	取值	参数	取值
J	43.14	D	5.5
$Y_m$	135025	p	382468
A	6.63	$Q_T$	92085.99

经换算， $Q_T$ 取值是  $124.85kN \cdot m$ 。出现断裂情况时，钻杆扭矩在  $18.4kN \cdot m$  左右，约为 15% 屈服扭矩，由此可知，工作扭矩并非导致钻杆断裂的原因。钻杆接头部位由于壁厚较厚，抗扭强度较其他部位更强，这也决定了该部位即使长时间承受工作扭矩的作用，仍不会因此出现断裂。分析断口形貌能够发现，断口由裂纹出现位置、扩展部分和瞬断部分构成，其中，裂纹起源于第 2 牙螺纹，扩展部分与齿底横截面完全重合，垂直拉伸应力，瞬断形成的断面整体十分平齐，符合疲劳断裂的特点。进一步分析能够发现，与断口形成方向平行的螺纹，其根部有大量微小裂纹存在，这表示齿底裂纹的扩展形式并不仅仅局限于周

向扩展，还包括径向扩展。

## 2.4 检测结论

本项目中，检测人员通过分析得出了以下结论：一是送检的失效、未失效钻杆，其晶粒度、化学成分均与项目要求相符，由于失效试样①已经无法正常发挥作用，故根据已经投入使用的试样②的试验结果，推断相应的结论。二是试样①失效的原因主要是其出现了疲劳断裂，裂痕起源于应力十分集中的螺纹根部。进一步分析问题产生原因发现，螺纹根部出现裂纹的原因是接头啮合部位受应力作用较大，正常工作状态下，裂纹持续扩展，剩余截面积所能承受的载荷大小超出实际载荷后，钻杆断裂并失效。

## 3 结束语

综上，本文通过深入探讨检测管材表面缺陷使用的技术，确定了不同技术的优缺点及适用场景，指出科学选用检测技术不仅能够保证检测结果准确，同时也可以使检测效率得到提高，对石油行业的发展有重大意义。未来，有关人员应持续聚焦于管材检测，不断探索全新的检测技术和方法，以弥补既有技术存在的不足，为石油行业的长效发展贡献力量。

## 参考文献：

- [1] 朱丽娟, 冯春, 刘芯言, 等. 融合注意力与残差网络的石油管材失效宏观影像智能识别方法 [J]. 石油管材与仪器, 2024, 10(01):33-40.
- [2] 王子阁. 相控阵超声波检测技术在石油专用管材检测领域的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(16):49-50.
- [3] 方伟, 张华, 许晓锋, 等. 石油管材标准体系现状及建设规划 [J]. 石油管材与仪器, 2021, 7(01):88-93.
- [4] 屈言森. 基于深度学习的管材表面缺陷检测技术研究 [D]. 太原科技大学, 2024.
- [5] 时瑾龙. 国外石油专用管材无损检测的现状与发展趋势 [J]. 石油矿场机械, 1989, 18(4):6.

## 作者简介：

张应骏 (1997-)，男，汉族，山东青岛人，大学本科，助理工程师，研究方向：石油管材金相检测。