石油钻具检测方法与应用

黄　磊

（中石化胜利石油工程有限公司管具技术服务中心，山东 东营 257000）

摘　要　石油钻井工具是一种专用的钻井工具，在井下工作时其运动状态非常复杂，通常由于长期的拉伸和扭转作用，钻具极易出现裂纹和管壁破损，对生产效率有一定的影响，严重时甚至可能导致断裂事故。采取有效的方法对石油钻具缺陷进行及时检测是十分必要的。本文论述了检测石油钻具螺纹的方法和流程，使用磁粉探伤法探测石油钻具螺纹的意义和缺陷，分析了石油钻具螺纹产生疲劳裂纹的原因，探讨了电磁探伤的原理和应用，分享了磁粉探伤、超声探伤、渗透探伤等方法，以避免井下事故，优化钻具生产效率。

关键词　石油钻具　螺纹　磁粉探伤

中图分类号：TE921　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1007-0745（2021）05-0001-04

石油钻井工具一般是指石油生产过程中使用的专用工具。主要部件为无缝钢管，物理性能强，具有耐疲劳、耐磨损和承受交变载荷的优点。此外，该石油钻井工具还包括六角形钻杆、钻头、减震器、稳定器等组件。钻具运行状态复杂，钻具因机体腐蚀损坏而报废，螺纹长期拉伸和扭转易断裂，从而导致断裂事故发生。因此，有必要采用钻探检测技术对缺陷进行及时检测。现有的电磁检测技术具有灵敏度高、操作方便等优点。它能快速、有效地检测出石油钻具螺纹体或螺纹上的裂纹并发现其缺陷，从而有效地避免危险事故的发生，提高钻具的工作效率。

1 石油钻具螺纹的检测方法和流程

1.1 检测方法

针对钻具螺纹，常用的检测方法主要有紫外灯法、磁化法、超声波检测法和穿透检测法。

（1）紫外灯法。为了检测效果的可靠性，应使用中心波长为 365nm，波长应为 320-400nm 的紫外灯。此外，滤光片表面距离紫外灯应为 380nm，紫外辐照度应大于 1000uw/cm^2。

（2）磁化法。钻具制造技术发展过程中，硅、硼、锰等元素逐渐应用于钻具制造中。然而，由于钻具长期在地下工作，从地球深处不断向上运动，导致钻柱产生磁化效应和一定量的剩磁。此外，由于石油钻井工具的长度从几米到 10 米以上不等，使用磁化石油钻井工具时，极限值一般为 0.8t，大于 0.8t 的钻井工具部件直接喷涂磁悬浮，不大于 0.8t 的钻井工具部件直流线圈部件最佳磁化时间为 3 秒。石油钻井工具磁化试验使用的磁悬浮，主要组成部分是 8g 荧光磁粉和 10 升煤油。这项工作精细而复杂，为了保证磁悬浮的质量，选择的煤油必须保证密度小、荧光磁粉高渗透率且流动性好，选用的必须是无毒、无臭、闪点高、粘度低的煤油。

（3）还有一种应用广泛的无损检测方法是超声波检测，其灵敏度高、穿透力强、检测灵活、成本低、效率高，并且对人体无害。检测金属、非金属材料的内部及表面缺陷都可以检测，还可以测量材料的厚度和强度。探伤检测的基本原理是利用高频脉冲发生器产生高频脉冲信号。脉冲信号从电声换能器转换为超声波脉冲，超声波脉冲通过探头传输到钻杆。当超声波在钻杆中传播，遇到有缺陷的界面或杆体界面时，反射信号被反射，反射信号由处理系统显示在示波器上。根据声波在该装置中的传播速度，可以计算出缺陷的深度。

（4）渗透试验具有操作简单、方法灵活、原理简单、适应性强的特点。浸渍法可用于钻具试验，刷涂法或喷涂法可用于大型钻具。它利用毛细作用。当渗透剂渗入待测设备一段时间后，对表面的渗透剂进行清洗和除去。利用显像剂的毛细效应吸附缺陷中的残留渗透，找出缺陷并进行检测。

1.2 石油钻具检测流程

石油钻井工具检测系统的主要组成部分是传感器、数字信号处理设备和支撑装置。在石油钻井工具无损检测过程中，利用扫描头对石油钻井工具及相应传感器运动过程中的整个表面状态进行扫描。因此，在石油钻具的无损检测中，主要应力取决于扫描头的整体旋转，扫描范围应该在螺旋轨迹方向上高于石油钻具，探测器的位置和相应的速度应该得到科学、准确的控制。信号预处理主要是指对所发送的信号进行放大、降噪等处理作业，在整个无损检测系统中处于中间水平位置。无损检测系统采集信号后，首先对相关信号进行平滑处理，消除信号数据中的干扰信号和异常值。此外，工频电压等客观因素也会影响石油钻具无损检测的准确性，导致一些特殊的信号点处于离散状态。针对这种情况，我们应对其进行放大误差处理操作，对出现的特殊信号点进行消除处理。

为了确保准确的效果，石油钻具螺纹检测流程必须遵照以下步骤执行：

（1）检测工作进行之前，清洗石油钻具，用角磨机敲打旧螺纹，去除锈、泥浆等，以恢复螺纹表面的金属色泽；

（2）对石油钻具进行磁化处理时要严格按照上面描述

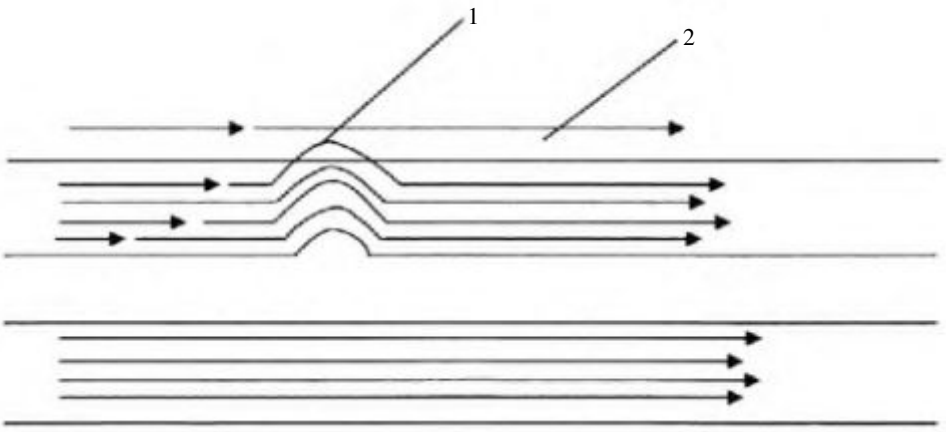

图 1 电磁检测原理

的磁化方法；

（3）摇动均匀的磁悬浮，以雾的形式将配置好的磁悬浮缓慢地喷洒在螺纹周围。如果钻具太多，为避免磁粉沉积导致泄漏检测，每喷 10 根螺纹需要摇动磁悬浮一次；

（4）用紫外线灯观察钻具螺纹，尤其是钻头根部，最佳距离不超过 100mm。用 5-10 倍放大镜观察螺母螺纹，使用紫外线灯时，严禁照射皮肤和面部，以免灼伤皮肤和眼睛；

（5）钻头螺纹是否正常的判断标准是磁性标记。如果线在紫外线照射时呈紫色，就没有裂缝；如果螺纹是锯齿状黄绿色荧光灯，就有疲劳裂纹；

（6）在钻具检验中发现缺陷时，处理原则是消除疲劳裂纹，用车床加工修复。可以用 30mm 以下的砂轮机将钻具的疲劳裂纹磨光。

2 石油钻具失效原因分析

2.1 钻具腐蚀和冲蚀失效原因

当氧气溶解在钻井或完井液中时，它会电离并与铁发生反应，形成氧腐蚀。在钻井液或完井液中溶解一定浓度的二氧化碳，形成弱酸性环境，与铁发生化学反应，二氧化碳被腐蚀。二氧化碳的溶解度随二氧化碳分压的增加而增加，二氧化碳的腐蚀随硫化氢的增加而增加。硫化氢溶解在钻井液或完井液中，形成二元弱酸性硫酸，与铁反应形成腐蚀裂缝，并使得氢沉淀。当氢气浓度达到一定值时，就会发生氢脆腐蚀。氧腐蚀、硫化氢腐蚀和二氧化碳腐蚀成为腐蚀坑，形成潜在的裂纹源。

2.2 钻具疲劳原因分析

地质条件存在一定的复杂性，因此在钻进的过程中，钻头重量不断变化。随着钻压的变化，钻柱的交变应力中心点也发生变化，使钻柱两侧的结构产生交变拉压应力，降低了材料的韧性，容易导致钻柱的疲劳断裂。根据机械振动理论，当钻柱以其固有频率相同的速度旋转时，就会发生共振。当发生共振时，钻杆很快就会疲劳。根据钻具的结构和力学特点，将钻具的失效模式分为螺杆失效和稠密过渡区失效。其中，钻具螺纹失效的形式主要是泄漏和断裂。其主要原因是螺纹是钻柱上最薄弱的环节，其使用寿命难以与钻具抗衡，承受着复杂的交变应力。

2.3 钻具螺纹产生疲劳裂纹的原因

螺纹疲劳断裂是石油钻具的主要失效形式，占零件断裂总数的 80%。疲劳裂纹出现的地方通常是受力集中的零件上，如钻具的螺纹根部，这也是易断件工人没有严格按照操作程序进行操作，导致石油钻井力的位置传递，提高了螺纹零件的承载能力。石油钻具裂纹一般呈锯齿状，长约 110 米。金属的交变应力与断裂周期密切相关，裂纹深度与长度成正比。

3 钻具管体电磁检测实例应用

3.1 检测设备

以新技术为例，该装置可用于检测管道的横向、纵向缺陷和壁厚变化。在测试前，用 8 个不同直径孔的钻杆样品对测试设备进行校准。Ezw（p）型综合探伤仪主要由中心探伤区（纵向探伤靴、横向探伤靴、厚度探伤靴、磁性线圈、旋转线圈、底座和支架、卡盘辊、喷标、可编程逻辑控制 PLC 系统）、两条传动自动线、消磁线圈、上下管、液压动力系统、遥控台和计算机等组成。

3.2 电磁检测原理

电磁检测的原理是，磁化处理后的铁磁性材料，其内部和外部表层的缺陷或者磁导率组织的变化会发生改变，磁路中相应的磁通量变化，部分磁通量直接通过缺陷，另一部分磁通量会绕过材料内部的缺陷，还有一部分会离开材料表面，通过缺陷周围的空气重新进入材料，在外表面形成漏磁场。漏磁检测是利用专用的磁场测量装置直接检测和记录漏磁场的存在。壁厚测量是基于磁密测量原理。如图 1 所示，管壁外的磁场线密度在 2 个位置处为常数，而在 1 个位置，管壁外的磁场线密度增大。而平均磁通是在管壁外测量，从而得到总的平均壁厚损失。

3.3 检测方法

一般采用固定回路磁力线圈来检测横向缺陷，管体上会有强大的纵向磁场产生。磁场纵向感应到管体轴，其中任意轴为 90。缺陷，如点蚀，横切，或 d 类缺陷，都将进

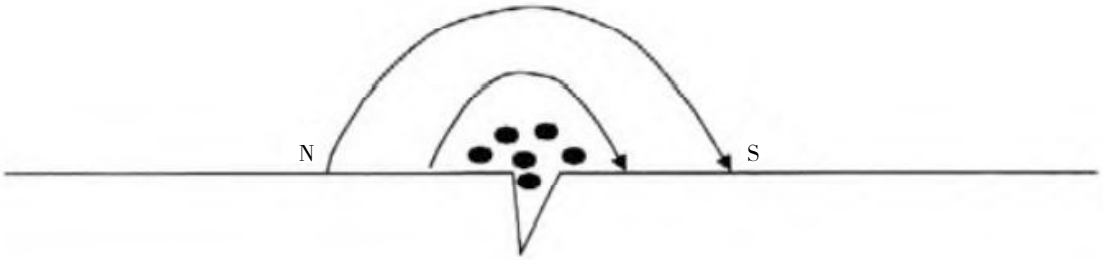

图 2 磁粉检测设备

行检测。当通过电磁线圈时，管体会被磁化，如果管体存在横向缺陷，由于管体表面和近表面的磁场线局部变形而产生漏磁场，用霍尔效应装置检测其大小。横向检查包括 8 只鞋，可形成 120% 的覆盖率，并且每天快速更换零部件，使用不同的尺寸。该设备可用于测试 27/8 英寸，31/2 英寸，5 英寸，51/2 英寸（1 英寸 =25.4 厘米）的钻井工具。检测原理上来说，纵向缺陷与横向缺陷的检测原理相同，但由于缺陷与磁场方向平行，因此无法检测到缺陷。产生漏磁场，可以检测到缺陷。采用四组探点效应装置（每组相邻两个探点各 1 个探点）检测 8 个探点的壁厚。

4 钻井螺纹磁粉探伤检测方法

4.1 原理

磁响应变化如果是由于结构异常或者是与缺陷有关，可以检测工程材料、构件和结构的表面缺陷。如果铁磁性材料的表层或其附近有缺陷（或结构状态有改变），导致磁阻效应大量增加时，材料表面空间会形成漏磁场，当细铁磁粉末（磁粉）涂敷在材料表面时，漏磁场形成的磁粉床吸附痕迹表明缺陷的存在和形状，如图 2 所示。

4.2 磁粉探伤的意义

石油开采关乎国家核心竞争力。我国的石油开采技术虽然在不断进步，但当前采用的石油钻井工具大部分是国内生产的。并且由于塔河地区的勘探井和开发井都是超深井，对钻具提出了更高的要求，有些企业往往直到石油钻具的所有规格都达不到才停业，而在被淘汰之前，石油钻具必须要进行荧光磁粉检测，这不但加大了检测石油钻具的难度，而且促进了石油钻具螺纹荧光颗粒检测技术的发展。在石油钻具螺纹荧光磁粉探伤技术应用之前，大量的石油钻具螺纹断裂事故每年都会发生，并且损失惨重。有了该项检测技术后，对多种石油钻具的检测成为了每年的必要工作，有效地消除了安全隐患，避免了经济损失。例如，2020 年，一家钻井企业检测石油钻井工具螺纹时使用了荧光磁粉，及时发现了大多数钻井工具的疲劳裂纹，避免了数百起潜在事故，收回了国家经济损失的百分之一，确保了石油钻井的安全。

4.3 检测设备

（1）加磁线圈，用来给工件加磁；（2）整流电路，实现交流电向直流电的转化，电流大小和方向可调；（3）黑光灯，用来观察磁痕。

5 超声波检测探伤

5.1 原理

超声波探伤的原理是，超声波能够从金属材料的深部穿透，拥有从一个部位反射到另一个部位的特点，属于检查零件缺陷的一种方法。采用脉冲回波法检测工件位置，用横波斜探针检测工件位置。探伤仪向探头发送电信号，激励探头的压电芯片产生 0.5−25mhz 的高频超声场，超声场穿过工件，在工件内传播。当超声场不连续时，超声场中的部分能量会被同一探头反射。声音信号在探头的作用下，转换成电信号，供接收电路使用，接收电路对声音信号进行放大和检测，最后将其显示在屏幕上。会有脉冲波形出现在荧光屏上，以此判断缺陷的大小和位置。

5.2 检测设备

当前使用的超声波探伤仪生产厂家是南京东大电子设备有限公司，型号是CUD-2030型，主要包括仪器主体、探头、校准仪用超声波基准块和相应的偶联剂。该仪器具有自动校准功能，可用于存储和打印测试信号。

5.3 检测方法

在屏幕上显示带有内加厚过渡区的标准 n5 槽，探针角度为 59.1。为了解决这一问题，本文提出了一种新的检测方法——系统增益 56.5db（检测标准高度），即检测管体所显示的所有信号与检测标准高度进行比较。

5.4 实例

目前采用 5 英寸钻杆为 API 标准三组钻杆，内外加厚式的管体头部。2020 年 10 月，中原石油勘探局第一公司 16 号钻井平台 50518 号，利用九龙里南鼻状构造带元禄 6 井伸缩钻具，在四川盆地东北河元坝低平缓构造带，自然为裂缝，钻杆 g105 级 1。信号数值显示非常大、窄，低增益 13.9 分贝，深度显示 8.8 毫米，长度 1.5 毫米 [1]。

6 渗透检测探伤

6.1 原理

液体渗透检测用于检测金属试样表面的无孔金属和开放性缺陷。用荧光染料或染色料溶解的渗透剂会用于样本表面，渗透剂会透过毛细现象渗入所有表面开裂的小缺陷，除去附着在工件表面上的任何多余渗透剂，然后用显影剂烘干和涂抹，在黑色或白色光线下观察，可以发现一些相应的黄绿色荧光或红色缺陷。

（下转第 6 页）

含油量少，菌浓达到 108 个 /mL，说明激活情况良好。施工考虑到伴注水对地层水敏伤害，使用的地层水伴注，可能存在配伍性差伤害地层。后期进行了酸化解堵，开井后最高日产液 8.1t，目前日液 4.5t，日油 0.5t。

M14-3-X109 井设计量：注入总量：200m^3。微生物菌液 8t，激活剂 10t，现场用注入水稀释至 180m^3，CO240t，顶替液 20m^3。开井后，排液 2 天，日产液量降低，后不出液，关井。

对于该井未达到增产目的进行了分析，认为主要原因：一是为二氧化碳冷伤害导致沥青质析出堵塞；二是激活剂与地层不配伍造成的颗粒型堵塞。从 J5-X257 井来看，单纯无机解堵无法有效解除地层堵塞，因此建议酸化与有机解堵剂进行复合解堵。

3.2 开展了提高稠油水平井生产压差技术研究

受油井井斜角的影响，普通泵的下泵深度一般不超过 45 度，限制了油井的生产压差。如 M137-P11 井，通过该井油藏基本数据，可以计算出该井的最佳下泵深度为 1078m，受井斜的影响，该井实际下泵深度仅 850m。

针对这种情况，引进了偏置阀抽油泵，该泵采用液力反馈技术，为杆柱下行提供动力，克服斜井、稠油井杆柱下行摩阻，同时泵阀采用弹簧复位球阀结构，适应水平井、大斜度井生产。

目前下入偏置阀泵 5 井次，平均增加井斜 15.0 度，平均增加泵深 132 米，平均增加液量 4.7 方，平均增加油量 0.4 吨。

4 结论及建议

（1）采取井筒掺水、加降粘剂能有效的改善稠油在井筒里的流动性，确保高粘度、低含水的油井正常生产；

（2）微生物采油应充分考虑稠油的温敏性（二氧化碳对地层的冷伤害），在这个基础上再进行微生物降粘试验；

（3）偏置阀泵能有效的提高大斜度井、水平井的下泵深度，增加生产压差，从而达到增加产量的目的。

参考文献：

[1] 董长银，等．油管掺液稠油泵井筒流体温度分布计算 [N]. 石油大学学报，2002,04(02):38-40.
[2] 王霞，等．微生物采油技术的发展现状 [J]. 石油地质与工程，1997,05(05):65-68.
[3] 郑向峰．深化研究，多措并举，提高稠油井管理水平 [Z]. 孤岛采油厂，2011,02.
[4] 柴京伟．稠油降粘方法概述 [J]. 科技创新与应用，2013(23):105.
[5] 耿宏章，等．影响原油粘度因素的试验研究 [N]. 青岛大学学报，2003,03(01):83-87.

（上接第 3 页）

6.2 检测设备

一系列 500 毫升从德国进口的喷雾罐被用作渗透测试，每组 3 罐，由高温清洗剂、高温渗透剂和高温显像剂组成。

6.3 检测方法

（1）在工件表面喷洒 hp-t 清洗剂，彻底干燥；（2）在试验区涂抹 hp-t 渗透剂，保存 15 分钟；（3）在擦拭布上喷洒 hp-t 清洗剂，清洗工件表面；（4）在工件表面喷洒 hd-t 成像剂 20-30 厘米，并在工件表面薄薄地涂抹；（5）在成像剂的白底上，缺陷呈鲜红色。

6.4 实例

2020 年 8 月，四川恢复了对非磁性钻铤内螺纹损伤的检测。无磁钻铤经清洗、渗透剂处理和显像后，接头状况良好 [2]。

7 结语

（1）磁粉检测的优点有很多，主要有：操作简单、检测结果直观、检测成本低、检测效率高等优点，但其缺陷深度不可知，适用范围仅限于检测铁磁性材料表面和近表面的缺陷。检测钻具损伤时，常用于铁磁性钻具管螺纹损伤的检测，效果良好。

（2）电磁测试技术主要是针对自动化测试，不但可以检测到缺陷的存在，而且根据检测到的漏磁场，可以检测到某些特征尺寸，例如缺陷的深度和长度，缺点是不能直观显示测试结果，而且测试结果容易受到周围环境的强电磁干扰影响，例如中、高频感应加热设备，常用于铁磁性钻具管体损伤的检测。

（3）超声波探伤具有灵敏度高、速度快、厚度大、低成本、无害、能够定位、定量检测缺陷的优点。然而，超声波探伤技术使用难度大，易受主客观因素的影响，检测结果难以保存。常用于测量管体的厚度、管体与接头的焊缝以及钻铤螺纹的损伤检测。

（4）渗透测试由于其简便的操作方式，因此无需复杂设备，且成本低，能直观地显示缺陷，具有很高的灵敏度，可以找到 1 微米的缺陷宽度，但对于松散的粉末冶金和其他多孔材料不适用。检测钻具损伤应用中，主要用于检测非磁性钻铤内外管螺纹的损伤。

总之，石油钻井工具是井下作业不可缺少的专业工具，成本高、投入价格也高。因此，石油企业对石油钻具特别是螺纹的维护应加强，通过对荧光磁粉探伤技术进行不断地改进，有效地检测出螺纹和易产生疲劳裂纹的部件的应力集中程度，消除井下作业事故的隐患，保证石油生产的顺利进行，有效地提高石油企业的经济效益和社会效益。

参考文献：

[1] 张哲，吕姗，张立民，等．油井管接箍表面磁粉探伤分析 [J]. 科技传播，2013(04):178-223.
[2] 刘启文．石油钻具缺陷的磁记忆检测试验研究 [J]. 科技资讯，2013(14):63.