

套管空间磁场分布特征实验研究

姜天杰, 秦璐*

(中海油田服务股份有限公司油田技术研究院, 河北 三河 065201)

摘要: 针对被动磁测距(PMR)技术中对套管磁场分布特征认识不足的问题,开展了套管空间磁场分布规律研究。搭建了由FVM-400型三轴磁通门磁力仪及无磁支架组成的测试系统,基于磁化理论分析,采用控制变量法对13%、9% in典型规格套管进行单根及组合工况下的轴向与径向磁场测试。结果表明:套管轴向磁场呈现类正弦波动特征,磁场梯度峰、谷值集中于接箍及端部区域;套管径向磁场强度随距离呈指数衰减;本实验条件下,套管轴向距端面2 m、径向距轴线8 m以外的磁场趋近于地磁场基准值;组合套管磁场形态受接箍磁极组合方式影响显著,同向组合在接箍处形成单一强峰,反向组合则呈“双峰双谷”特征,且同向组合的磁场强度与影响范围更大;相同规格套管存在剩磁个体差异。研究揭示了套管尺寸、剩磁及磁极组合对磁场空间分布的影响机制,为完善PMR技术理论模型、提升强干扰背景下磁场信号解析能力提供了实验依据与基础数据支撑。

关键词: 被动磁测距;套管;磁场分布;磁极组合;剩磁;井眼防碰;试验研究

中图分类号: TE243;P634.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)03-0051-08

Experimental study on spatial magnetic field distribution characteristics around casing strings

JIANG Tianjie, QIN Lu*

(Well-Tech Department, China Oilfield Services Limited, Sanhe Hebei 065201, China)

Abstract: To address the insufficient understanding of casing magnetic field distribution characteristics in passive magnetic ranging (PMR) technology, this study investigates the spatial magnetic field distribution laws around casings. A testing system consisting of an FVM-400 three-axis fluxgate magnetometer and non-magnetic supports was established. Based on magnetization theory analysis, axial and radial magnetic field tests were conducted on typical 13 % and 9 % inches casings under single and combined conditions using the control variable method. The results indicate that the axial magnetic field of the casing exhibits sinusoidal-like fluctuation characteristics, with the peak and valley values of the magnetic field gradient concentrated in the collar and end regions. The radial magnetic field intensity decays exponentially with distance. Under the experimental conditions, the magnetic field approaches the geomagnetic field reference value at distances greater than 2 m axially from the end face and 8 m radially from the axis. The magnetic field morphology of combined casings is significantly influenced by the magnetic pole combination at the collar: same-direction combinations form a single strong peak at the collar, while reverse combinations exhibit "double-peak and double-valley" characteristics, with the former showing greater magnetic field intensity and influence range. Additionally, casings of the same specification exhibit individual differences in remanent magnetism. This study reveals the influence mechanisms of casing size, remanent magnetism, and magnetic pole combination on the spatial distribution of the magnetic field, providing an experimental basis and fundamental data support for refining PMR

收稿日期: 2025-09-16; **修回日期:** 2025-12-30 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2026.03.006

基金项目: 国家科技重大专项课题“海洋丛式井主动避让与自循轨钻井技术研究”(编号:2025ZD1403203)

第一作者: 姜天杰,男,汉族,1979年生,工程师,仪器仪表工程专业,硕士,主要从事随钻定向测量仪器研发和丛式井防碰关键技术研究工作,河北省三河市燕郊经济技术开发区海油大街201号,jiangtj@cosl.com.cn。

通信作者: 秦璐,女,汉族,1996年生,工程师,仪器仪表工程专业,硕士,主要从事随钻定向测量仪器研发和丛式井防碰关键技术研究工作,河北省三河市燕郊经济技术开发区海油大街201号,qinlu@cosl.com.cn。

引用格式: 姜天杰,秦璐.套管空间磁场分布特征实验研究[J].钻探工程,2026,53(3):51-58.

JIANG Tianjie, QIN Lu. Experimental study on spatial magnetic field distribution characteristics around casing strings [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(3): 51-58.

theoretical models and enhancing magnetic field signal analysis capabilities under strong interference backgrounds.

Key words: passive magnetic ranging; casing; magnetic field distribution; magnetic pole combination; remanent magnetism; wellbore collision avoidance; experimental study

0 引言

随着油气田开发向复杂结构井(如SAGD双水平井、丛式井)发展,对邻井位置监测技术的需求日益迫切^[1]。被动磁测量(Passive Magnetic Ranging, PMR)技术通过检测目标井套管自身磁场实现无接触测距,因无需主动源、不干扰现有井眼作业,成为井眼防碰、救援井对接等领域的关键手段^[2]。其起源可追溯至20世纪70年代,Shell公司首次提出利用套管剩磁引导救援井对接的思路^[3]。Robinson等通过建立套管磁偶极子模型,证实了磁场信号可反演井间相对位置,为PMR奠定理论基础^[4]。

随着技术进步,PMR应用从救援井拓展至SAGD双水平井,用于保障注入井与生产井的精准间距^[5]。确定性动态测量(Definitive Dynamic Survey, DDS)技术的引入,使PMR实现随钻数据采集,节省了大量钻进时间^[6]。然而,PMR技术发展受限于对套管磁场分布特征的认识不足。地磁场、钻井液铁磁性颗粒等干扰导致信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)不足,Shao等^[7]的研究指出,SNR<6 dB时难以提取有效信号,而丛式井中多套管磁场的叠加效应,进一步增加了信号分离的难度,现有研究缺乏多源磁场的耦合规律分析。传统静态测量存在井壁失稳风险,动态测量因缺乏套管动态磁场数据,精度仍低于静态模式^[8]。水平井中套管与传感器的姿态变化导致磁场各向异性,现有模型因基于竖直套管假设,实际应用中误差较大^[9]。与此同时,井下铁磁材料的磁化干扰问题也备受关注。姜天杰等^[10]通过实验研究了钻具磁化磁场对方位角测量误差的影响,为理解与校正井下磁干扰提供了重要参考。

针对上述问题,本文通过现场测试,研究套管尺寸、接箍、磁极组合等因素对磁场分布的影响。为提升PMR技术在强干扰环境下的定位精度和可靠性提供基础数据,对推动PMR技术在井眼防碰、救援井对接等工程中的应用具有重要意义。

1 磁化基础理论

磁性物质内部存在大量微小磁畴,每个磁畴均

具有独立磁矩。在自然状态下,磁畴磁矩方向随机分布,整体对外不显磁性;当受到外磁场作用时,磁畴磁矩方向趋于一致,物质对外呈现磁性,这一过程称为磁化^[11]。对于铁磁性材料(如套管常用的合金钢),其磁化过程通常包含可逆与不可逆阶段,并表现出高磁导率、磁饱和及磁滞等特性。

本文研究的套管材料为添加Cr、Mo、Ni等合金元素的低合金钢,在提升强度、韧性和耐腐蚀性的同时,仍保持典型的铁磁性。在恒定地磁场作用下,套管整体将沿地磁场方向被均匀磁化,其管体相当于一个沿轴向的磁化柱体。然而,由于材料内部存在晶界、位错、内应力及成分不均匀等微观缺陷,在磁化过程中会对磁畴壁的移动产生“钉扎”作用,导致磁化过程存在不可逆性。因此,即使处于相同的外磁场中,不同套管的磁化状态仍可能存在差异^[12]。

需注意的是,本研究应用的套管接箍部位通常经过锻造、热处理及螺纹加工等,其微观组织与应力状态与管体有所不同,导致该区域磁畴排列的稳定性更强。在经历地磁场磁化后,接箍处往往表现出比管体更强的剩磁,且剩磁方向与强度具有较大的随机性。因此,在分析套管周围空间磁场时,需将套管视为呈均匀磁化背景的管体与具有较强离散剩磁的接箍共同构成的复合磁源。

2 实验测试装置及方案

2.1 实验测试装置

为精准测量套管周围空间磁场分布,本研究搭建了包含硬件测量单元与无磁支撑装置的套管空间磁场测试装置,实现对套管周围磁场的稳定检测。其硬件核心为FVM-400型三轴便携式磁通门磁力仪,如图1所示。该仪器专为地磁勘探设计,具备高精度、便携等特点,测量单位采用mGs。根据仪器技术参数,其标称精度为0.05 mGs;实际测量中观察到,数据仅小数点后一位保持稳定,故后续测量中统一保留一位小数,以确保数据可靠性。无磁支撑装置包括无磁支架与无磁测试工装,如图2所示,均采用非磁性木质材料制作,以避免自身产生磁干扰。无磁支架采用榫卯结构连接,高度1.8 m,

既满足套管支撑的强度要求,又可根据不同规格套管的长度灵活组合使用,确保套管水平稳定放置。无磁测试工装由两侧支架、轴向滑动杆及探头安装滑块组成。两侧支架通过适配不同尺寸的垫块,可调节轴向滑动杆高度,使其与套管轴心保持一致。磁力仪探头固定于滑块上,滑块可沿轴向滑动杆平稳移动,实现对套管轴向及径向不同位置磁场的连续测量。



图1 磁通门磁力仪

Fig.1 Fluxgate magnetometer

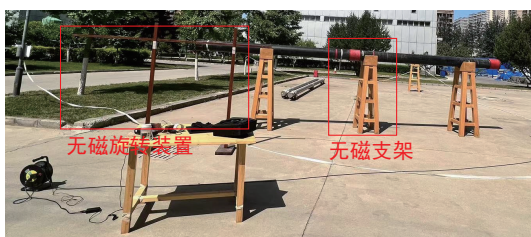


图2 无磁测试工装示意

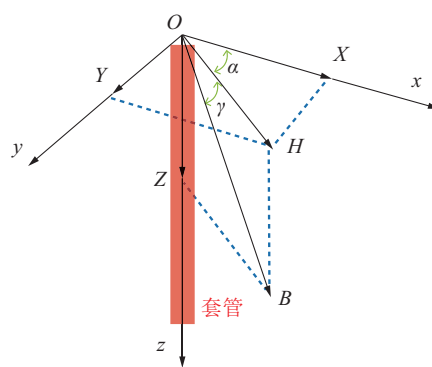
Fig.2 Schematic diagram of non-magnetic testing tooling

该测试系统通过硬件与机械装置的协同,可在屏蔽外界磁干扰的条件下,获取套管周围空间的磁场分布数据,为后续分析套管磁场特征提供可靠实验基础。

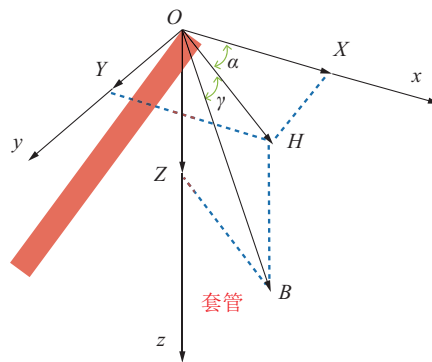
2.2 实验测试方案

在实际工程应用中,大地直角坐标系下,假定套管垂直于地面(沿 z 轴方向),如图3(a)所示,当水平磁场(磁北方向)穿过竖直套管时,磁场方向与套管轴线(竖直)垂直,此时磁场以“径向”穿过套管壁。实际工程中套管姿态随钻井、管道铺设等场景的功能需求变化,其受力、电磁场分布、流体流动等特性会受到重力、地应力、地磁场倾斜分量等多重复杂因素的叠加影响。本研究实验的核心目的是

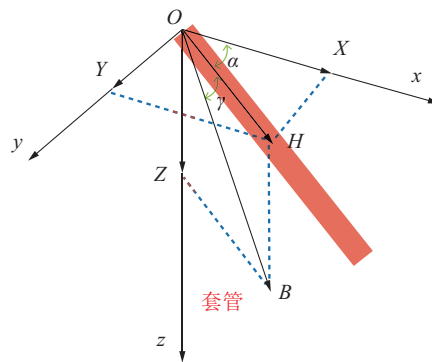
测试在地磁场影响下套管周围空间磁场分布特征,因此实验中套管平行于地面摆放,极大降低了实验难度和空间布局限制,此时摆放方式如图3(b)和图3(c)所示,垂直于磁北方向和平行于磁北方向。平行于磁北水平放置时,磁场方向与套管轴线完全一致,可单独研究“轴向磁场穿过套管”的核心过程,有效激发轴向特性,确保不同实验批次、不同套管样品的数据因“磁场方向一致”而具有可比性。两者虽姿态不同,但物理本质一致,确保了实验数据对工程的直接指导价值。



(a)工程中套管位置



(b)测试套管垂直磁北方向



(c)测试套管平行磁北方向

图3 套管摆放位置示意

Fig.3 Schematic diagram of casing placement position

基于地磁场-套管磁化特性,套管磁极方向与地磁场的相对关系直接影响磁场测量特征:当套管接箍磁极(N/S)与地磁场方向相反时,测量磁通密度的模呈现“增大—增大—增大”的变化趋势,最终趋近于地磁场基准值;当套管接箍磁极与地磁场方向一致时,磁通密度的模则表现为“减小—增大—减小”的变化特征。套管在地磁场中磁化如图4所示。

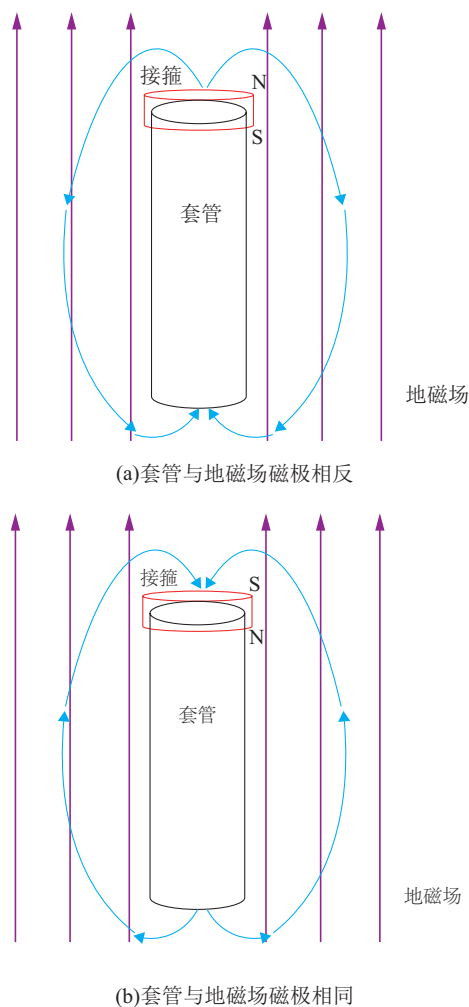


图4 套管在地磁场中磁化示意
Fig.4 Magnetization diagram of casing
in geomagnetic field

套管测试采用轴向与径向联合测量方案,以南侧端面为坐标原点构建测试坐标系。轴向测试如图5所示,探头距套管轴线160 cm,沿轴向以10 cm为步长进行扫描,测试范围覆盖套管两端外侧区域;为消除因套管更换导致的测量误差,采用套管两端外侧磁通密度的模的平均值作为校正依据。

径向测试如图6所示,以轴向磁通密度的模最大值为起点,探头沿垂直于套管轴线方向逐步远离,以10 cm为步长记录数据,直至磁通密度的模稳定并接近地磁场基准值,以量化磁场随径向距离的衰减规律。



图5 轴向测试方案
Fig.5 Axial testing scheme

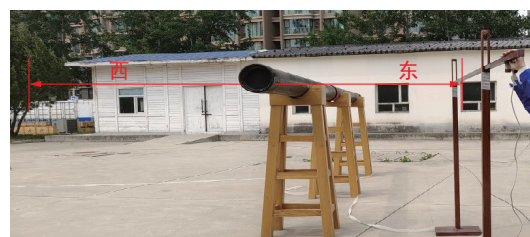


图6 径向测试方案
Fig.6 Radial testing scheme

实验选用13%、9% in (1 in=25.4 mm,下同)典型规格套管,涵盖单根套管及多根组合套管2种工况,套管组合如图7所示。对于组合套管,考虑到套管剩磁特性,设计接箍处B/C和A/C 2种磁极组合方式。测试时先标记套管两端位置,完成一种组合测量后,固定一根套管并调换另一根的两端方向以实现磁极反向,从而系统探究不同磁极组合对磁场分布的影响。

通过控制变量法,系统改变套管规格(13%、9% in)、磁极组合方式及空间测量位置,获取不同工况下的磁场分布数据,为解析套管尺寸、剩磁及

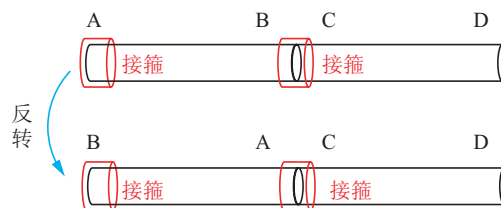


图7 套管组合示意
Fig.7 Schematic diagram of casing combination

磁极组合对磁场分布的影响规律提供实验支撑。

3 套管空间磁场测试及规律分析

选取 13 $\frac{3}{8}$ 、9 $\frac{5}{8}$ in 2 种典型规格套管,通过控制变量法开展单根及组合套管的轴向与径向磁场测试。实验在室外开阔场地进行,环境温度约为 25 $^{\circ}\text{C}$,以减小温度剧烈波动对铁磁性材料磁特性的影响。磁场测量易受地磁场日变、环境磁干扰及仪器自身噪声影响。为控制误差:(1)采用全木质无磁支撑装置,最大限度消除测试工装引入的磁干扰;(2)每次测量前后记录远离套管的背景磁场值,取其平均值 521 mGs 作为地磁场基准;(3)测量在短时间内连续完成,以降低地磁日变的影响;(4)使用 FVM-400 型三轴磁通门磁力仪,其标称精度为 ± 0.05 mGs。通过对稳定磁场多次测量,实测数据标准差 < 0.1 mGs,故文中磁场数据均保留至小数点后一位,以反映有效的测量精度。需指出,井下高温环境会导致磁化强度减弱,本实验在常温下所获磁场强度在井下应用时可能因温度升高而降低。

在套管接箍及拼接部位,接箍半径大于套管本体半径,但套管周围磁场分布主要与剩磁大小相关,而非材料体积。关于组合套管的磁场分布,参考已有研究^[13]:当单根套管采用同极性连接(如 N-N 或 S-S)时,相邻套管磁场分布模式相似,仅方向相反;异极性连接(如 N-S 或 S-N)亦呈现类似特征。以 N-S 连接为例,此时各单根套管磁化强度方向一致。因此,重点在于分析套管连接方式为同向还是反向。理论分析与实验结果表明,在同极性连接条件下,套管柱周围的磁感应强度及其影响范围均显著增大;而在异极性连接条件下,磁感应强度及作用范围未见明显提升。

3.1 13 $\frac{3}{8}$ in 套管

实验选用 3 根 13 $\frac{3}{8}$ in 套管,其尺寸和结构如图 8 所示。测试采用控制变量法:1 号套管为单根套管,分别进行轴向东、西方向测量;2 号、3 号套管为组合套管,分别对应磁极组合 BC 与磁极组合 AC,测试范围覆盖套管轴向关键区域。

1 号套管测试中,探头距轴线 160 cm,以套管南侧面为原点,沿轴向以 10 cm 步长扫描(西侧测量 690 cm,东侧 830 cm),测量方案如图 9 所示,测试结果如图 10 所示。轴向磁场呈类正弦波动特征:波峰位于距南侧面约 120 cm 处,磁通密度的模为

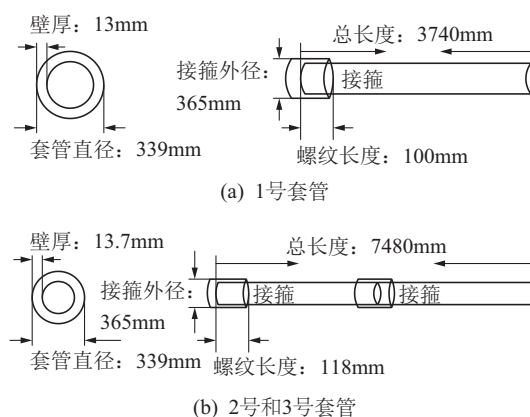


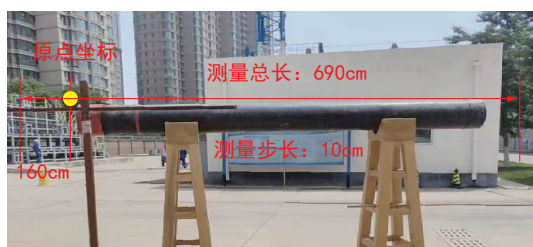
图 8 13 $\frac{3}{8}$ in 套管结构和尺寸

Fig.8 Structure and size of 13 $\frac{3}{8}$ inches casing

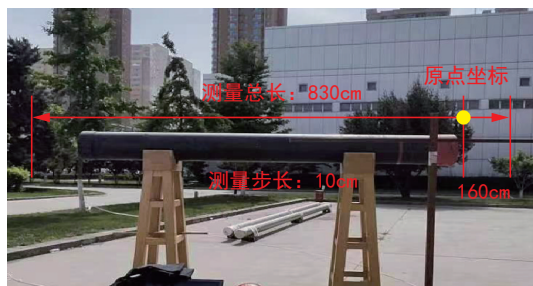
549.2 mGs;波谷位于约 440 cm 处,磁通密度的模为 527.1 mGs。磁场梯度在接箍附近显著增大,在端面区域则显著减小。该波动特征的物理机制源于套管主体在地磁场中感应磁化产生的背景场与接箍部位剩磁所形成的局部强磁源的叠加作用。对于有限长磁化体,其两端因磁化不连续而形成磁荷,从而在轴线外产生类正弦分布的背景磁场。接箍作为剩磁显著集中的部位,其磁矩强于管体,构成离散的局部磁源。当探头沿轴向移动时,接箍处强剩磁引起的磁场扰动会叠加在端部磁荷产生的背景场上,形成明显的磁场极值与梯度急剧变化区。

2 号套管磁极组合为 BC,采集东西两侧距轴线 160 cm 处数据(步长 10 cm,测量 1080 cm),测试结果如图 11 所示。磁场在拼接接箍与端面之间呈现单一强峰,峰值 562.5 mGs 位于轴向 530 cm 处。磁场梯度在套管接箍和端面处最小,在拼接接箍处最大。该单一强峰源于两根套管在接箍处磁极方向相同,进行叠加,形成强度突出、空间集中的局域强磁源。

3 号套管为磁极组合 AC,测量总长为 1050 cm,步长为 10 cm,测试结果如图 12 所示。磁场呈现“双峰双谷”特征:第一波峰坐标为(160 cm, 100 cm),磁通密度的模为 551.8 mGs,第二波峰坐标为(160 cm, 600 cm),磁通密度的模为 546.5 mGs,第一波谷坐标为(160 cm, 360 cm),磁通密度的模为 530.8 mGs,第二波谷坐标为(160 cm, 810 cm),磁通密度的模为 526.7 mGs;磁场梯度在套管接箍附近最大,在套管端面和拼接处附近最小。



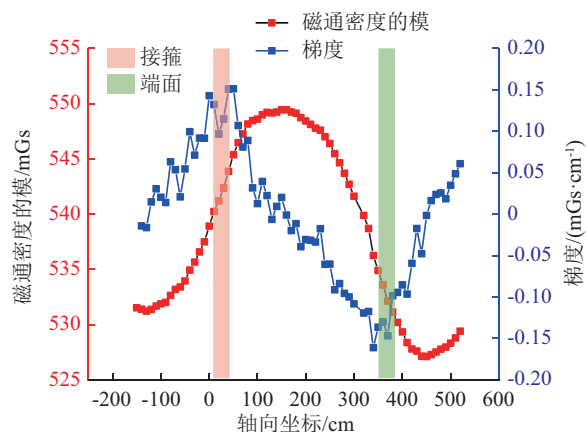
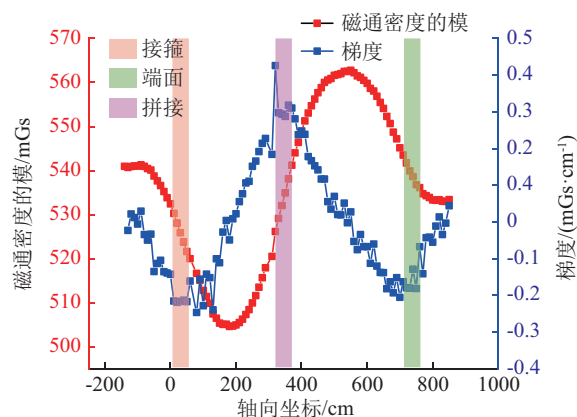
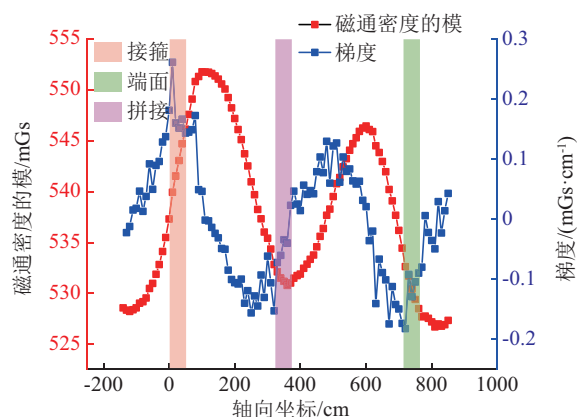
(a) 西侧测量方案



(b) 东侧测量方案



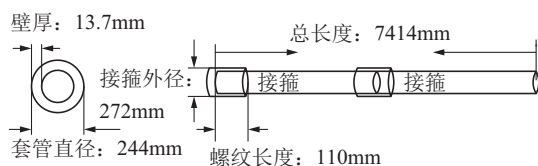
(c) 测量方向

图9 1号13^{3/8}in套管测试示意Fig.9 Schematic diagram of No.1 13^{3/8} inches casing testing图10 1号13^{3/8}in套管周围空间测试结果Fig.10 Test results of the surrounding space of No. 1 13^{3/8} inches casing图11 2号13^{3/8}in套管周围空间测试结果Fig.11 Test results of the surrounding space of No. 2 13^{3/8} inches casing图12 3号13^{3/8}in套管周围空间测试结果Fig.12 Test results of the surrounding space of No. 3 13^{3/8} inches casing

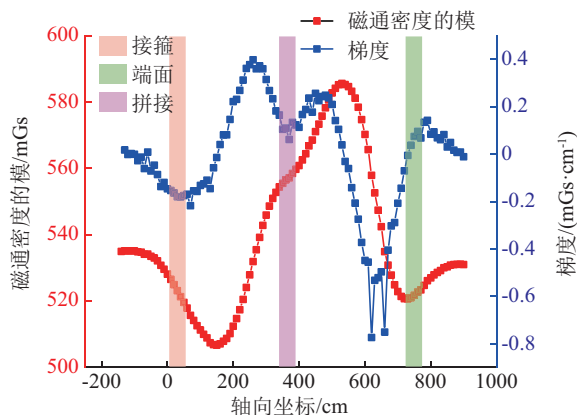
对比2号与3号套管的测试结果可知,轴向磁场曲线形态的差异主要源于接箍处磁极相对方向不同所导致的磁矩叠加效应不同。同向组合(BC)通过磁矩叠加形成单一强磁源,表现为单一强峰;反向组合(AC)则因磁矩叠加削弱了接箍处的净磁矩,使磁场反映各单根套管自身剩磁分布的叠加特征,呈现多极值结构。该规律为利用磁场信号反演井下套管连接状态与磁极序列提供了理论依据。此外,同向连接的套管柱其周围剩磁感应强度及影响范围均大于反向连接,有利于增强接箍附近的磁场信号及磁测距范围。

3.2 9% in 套管

实验选用的9% in 套管尺寸和结构如图13所示。测试对象为两根组合套管,采用东西双向径向测试,轴向总测量1080 cm,测量步长为10 cm。

图13 9 $\frac{5}{8}$ in套管结构和尺寸Fig.13 Structure and size of 9 $\frac{5}{8}$ inches casing

轴向测试结果如图14所示。磁场沿轴向呈现类正弦波动形态,存在明显的波峰与波谷,存在单一强峰,波峰位于轴向约530 cm处,磁通密度的模为585.6 mGs;波谷分别位于约150、720 cm处,磁通密度的模分别为506.7、520.7 mGs。接箍处磁矩方向相同,形成单一强峰,与13 $\frac{3}{8}$ in套管同向组合规律一致。

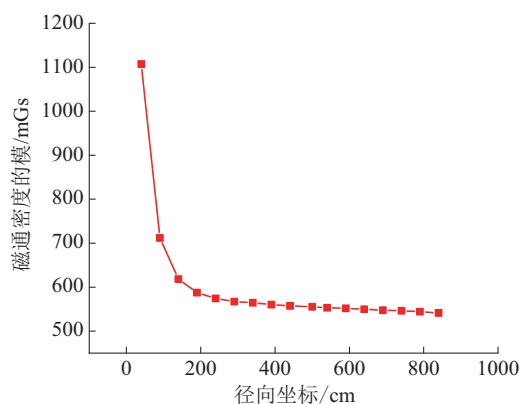
图14 9 $\frac{5}{8}$ in套管周围空间测试结果Fig.14 Test results of the space around a 9 $\frac{5}{8}$ inches casing

径向测试结果如图15所示。磁场强度随径向距离增加呈指数衰减,至8 m处趋近地于磁场基准值521 mGs,进一步验证了套管磁场的空间衰减规律。

4 结论

本研究通过对13 $\frac{3}{8}$ 、9 $\frac{5}{8}$ in新套管的系统实验测试,揭示了套管空间磁场的分布规律,为PMR技术在复杂井眼防碰中的应用提供了关键实验依据,得到以下主要结论。

(1)在地表理想环境中,单根套管磁场具有显著的空间分布特征:轴向磁场呈现类正弦波动形态,梯度波峰与波谷集中分布于套管接箍及端部区域;径向磁场强度随距离增加呈指数衰减。在本次实验所

图15 9 $\frac{5}{8}$ in套管径向测试结果Fig.15 Radial test results of 9 $\frac{5}{8}$ inches casing

用传感器精度下,套管轴向距端面2 m、径向距轴线8 m以外的磁场趋近于地磁场基准值(521 mGs)。该结论明确了地表无干扰条件下的物理衰减规律,但不能直接作为井下实际探测距离,仅为认识套管磁场空间分布形态提供依据。

(2)组合套管磁场形态受接箍处磁极组合方式影响:同向组合(BC)在接箍处形成单一强峰,反向组合(AC)则呈“双峰双谷”特征。这为PMR技术识别接箍位置、判断磁极方向提供了直接依据。

(3)同向套管柱周围剩磁感应强度相比于反向磁极连接较大,剩磁影响范围也相对较大,可以增大套管柱周围(尤其是接箍附近)的磁感应强度及磁测距范围。

(4)实验结果验证了地磁场-套管磁化理论模型的合理性,所获取的磁场分布数据(包括轴向、径向衰减曲线)为PMR技术提供了数据支撑,可利用检测磁场梯度剧烈变化判断套管位置。

(5)相同规格套管因制造工艺差异导致剩磁不同,其磁场分布亦存在显著个体差异,表明在PMR实际应用中需考虑套管个体剩磁特性。

本研究系统揭示了套管尺寸、剩磁特性及磁极组合对磁场分布的影响机制,为构建更贴近实际井下环境的PMR测距模型、提升强干扰背景下磁场信号解析能力提供了实验基础与理论参考。

参考文献(References):

- [1] 杨连行. 磁导向钻井技术在辽河油田复杂结构井的应用[J]. 石化技术, 2022, 29(6): 69-71.
YANG Lianxing. Research and application of magnetic steering drilling technology in complex structure wells in Liaohe Oilfield [J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29(6): 69-71.

- [2] Noort R V, Abrant W, Towle J. Well planning based on passive magnetic ranging and magnetized casing[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio: Society of Petroleum Engineers, 2012:SPE-159404-MS.
- [3] ElGizawy M, Fraser M, Lowdon R, et al. A novel realtime well collision avoidance monitoring by definitive dynamic surveys and passive magnetic ranging[C]//ADIPEC. Abu Dhabi: Society of Petroleum Engineers, 2022:SPE-211791-MS.
- [4] ElGizawy M, Fraser M, Soh A, et al. First sagd well placement using non-stationary definitive dynamic surveys passive magnetic ranging and gyro while drilling[C]//IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition. Galveston: IADC, 2024: SPE-217702-MS.
- [5] 李峰飞,叶吉华,阳文学.电磁探测定位系统及其在救援井设计中的应用[J].石油钻采工艺,2015,37(1):154-159.
LI Fengfei, YE Jihua, YANG Wenxue. Application of electromagnetic detection and location system in the design of relief well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 154-159.
- [6] 范家怿.丛式井邻井距离电磁探测方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
FAN Jiayi. Study on distance electromagnetic detection method for adjacent wells in cluster wells[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [7] Shao G L, Guo Y X. An optimal design for passive magnetic localization system based on SNR evaluation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(7):4324-4333.
- [8] ElGizawy M, Rakhmangulov R, Allen W, et al. Managing well collision risk by disruptive ranging technology without impacting rig time[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans: Society of Petroleum Engineers, 2024: SPE-220770-MS.
- [9] 高德利,刁斌斌.复杂结构井磁导向钻井技术进展[J].石油钻探技术,2016,44(5):1-9.
GAO Deli, DIAO Binbin. Development of the magnetic guidance drilling technique in complex well engineering[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 1-9.
- [10] 姜天杰,菅光霄,刘峰,等.基于方位角测量误差分析的钻具磁化磁场实验研究[J].钻探工程,2025,52(4):54-60.
JIANG Tianjie, JIAN Guangxiao, LIU Feng, et al. Experiment study on the magnetized magnetic field of drilling tools based on azimuth measurement error analysis[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4): 54-60.
- [11] 潘向阳.磁化套管周围磁场分布规律研究[D].荆州:长江大学,2024.
PAN Xiangyang. Research on the distribution law of magnetic field around magnetized casing[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2024.
- [12] 张健.套管周围磁场分布规律研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2017.
ZHANG Jian. Study on distribution of magnetic field around casing string[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [13] Shi Y C, Jia D Y, Guan Z C, et al. A theoretical model of residual magnetic field around a pre-magnetized casing string[J]. Energies, 2020, 13(16): 4226.

(编辑 王跃伟)