

高抑制性冲洗液在软弱地层岩心获取质量提升中的作用分析

陈刚

湖南省自然资源调查所, 湖南娄底, 417000;

摘要: 软弱地层钻取岩心时, 井壁失稳、水化膨胀、泥饼剥落易造成岩心结构破碎, 削弱样品完整性与代表性, 高抑制性冲洗液抑制地层水化、提升泥页岩抗软化能力、减轻钻井液对岩心的扰动侵入, 能提升岩心成型质量, 控制井壁坍塌、减少裂隙扩展、保持原生结构效果显著, 获取的岩心几何形态、强度及物性保持更稳定, 研究高抑制性冲洗液作用机制与影响因素, 可为软弱地层岩心获取提供可靠技术路径, 支撑地层评价与工程优化。

关键词: 高抑制性冲洗液; 软弱地层; 岩心获取; 井壁稳定; 水化抑制

DOI: 10.69979/3029-2727.26.05.072

引言

软弱地层结构松散、含水敏感性强、应力条件复杂, 岩心钻取时易出现破碎倾向, 增加准确记录地下地质信息的难度, 传统冲洗液接触敏感地层后引发水化软化与孔隙结构扰动, 破坏岩心原生特征, 高抑制性冲洗液稳定性强、抑制效果好, 用于缓解这一获取难题。降低水化反应速率、控制井壁形变、减少钻井液侵入, 能让岩心更接近原始状态, 分析其在软弱地层的应用, 可揭示冲洗液性能与岩心完整性的关联, 为提升岩心获取质量提供科学依据。

1 软弱地层岩心质量受限的关键影响因素

顶管法施工对土体产生扰动效应, 进而改变了土层的应力形态, 通常将顶管顶进对土体扰动划分为固结形式、挤压形式、剪切形式以及卸荷形式。施工过程, 土层的物理力学性质随之改变, 顶进面的土体受到挤压力, 而顶管设备与周边土体为剪切作用, 卸荷作用通常引起局部应力状态显著变化, 几种形式的作用耦合将引起顶管法施工过程出现隆起或是沉降现象, 对周边环境产生不利影响。软弱地层岩心钻取时, 岩心质量受地层物性特征与力学响应制约, 此类地层多呈现胶结度低、裂隙发育、孔隙结构松散特征, 钻压与井壁扰动下更易发生结构破碎与剥落, 导致获取的岩心难以保持原始形态^[1]。黏土矿物含量高的层段遇水后显现吸水膨胀与水化软化趋势, 孔隙骨架支撑能力下降, 致使岩心钻取时出现脱落、解体、剥片, 软弱地层原地应力不均、层面倾角复杂, 还会加剧岩心受载后的不稳定破坏, 进一步降低岩心完整性。

钻井液与地层相互作用时, 软弱岩性对液体侵入格

外敏感, 常规冲洗液渗入孔隙或微裂隙, 会改变岩心孔隙压力分布, 使地层产生额外渗透驱动效应, 冲洗液缺乏抑制性能时, 泥页岩等水敏性岩石易出现水化剥蚀、结构松散、泥皮脱附, 岩心几何形态与结构保持度随之降低。冲洗液滤失量大, 会加剧孔隙压力失衡, 削弱井壁承载力, 诱发微裂隙扩展并传递至岩心主体, 这种情况下, 取出的岩心多呈碎散、分层或局部剥落状态, 影响其对地层物性和力学参数的反映。

软弱地层钻取还易受井眼扰动的累积破坏效应影响, 钻具带来的机械振动、扭矩波动与剪切扰动作用于低强度地层, 地层边界易产生屈服变形, 进而影响岩心成型质量, 井壁一旦坍塌、掉块或局部滑移, 会改变岩心进入取心筒的受力环境, 导致岩心在收缩、摩擦、碰撞中发生结构损伤。循环压力变化、泵排量波动与井底流场分布不均, 会造成软弱岩体表现出加工硬化、扰动破裂与应力集中, 进一步降低岩心成型完整性, 上述因素共同构成软弱地层岩心质量的主要制约因素, 给后续岩心评价与分析带来多重挑战。

2 高抑制性冲洗液改善岩心获取质量的机制路径

高抑制性冲洗液对软弱地层岩心获取质量的改善并非单一作用的结果, 而是通过多维度机制协同作用, 从微观矿物作用到宏观井眼环境调控, 构建起岩心保护的完整体系。其核心逻辑在于精准靶向软弱地层岩心破坏的关键诱因, 通过抑制水化、阻断渗透、削弱扰动、稳定环境四大核心路径, 实现岩心原生状态的最大化保留, 具体可细化为以下四个方面:

2.1 靶向抑制水化反应, 稳固岩心微观骨架结构

软弱地层岩心破碎的首要诱因是黏土矿物的水化膨胀与软化,高抑制性冲洗液的核心优势在于通过化学作用精准阻断这一过程。从作用机理来看,其配方中优选的多价阳离子(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+})可与黏土矿物晶层表面的低价阳离子(如 Na^{+})发生离子交换,一方面降低黏土颗粒表面的电动电位,削弱颗粒间的排斥力,促使片状黏土颗粒发生聚结收缩;另一方面,多价阳离子可嵌入黏土晶层间隙,形成稳定的离子桥,限制晶层间的吸水膨胀空间,从根源上降低水化速率^[2]。同时,配方中的有机抑制剂(如聚胺、咪唑啉等)与聚合物包被剂可通过吸附作用在黏土颗粒表面形成致密的保护膜,不仅能屏蔽黏土颗粒的负电荷活性,还能阻断自由水向黏土矿物内部的扩散与吸附通道,避免岩心孔隙骨架因吸水而出现支撑能力衰减。相较于传统冲洗液,高抑制性冲洗液可使黏土矿物的水化膨胀率降低60%以上,显著提升岩心在钻取过程中的抗软化、抗剥落能力,为岩心成型提供稳定的微观力学基础。

2.2 强化渗透封堵能力,维持井眼与岩心压力平衡

冲洗液向地层的渗透侵入与滤失量过大,是引发岩心孔隙压力失衡、裂隙扩展的重要因素,高抑制性冲洗液通过“快速成膜+深度封堵”的双重作用,有效解决这一问题。在与井壁接触后,其优异的滤失控制性能可促使冲洗液中的固相颗粒(如超细碳酸钙、沥青质颗粒等)快速在井壁表面沉积,形成一层厚度薄、渗透率低的致密泥饼层,这层泥饼不仅能阻止冲洗液中的自由水大量侵入地层,还能起到“物理屏障”作用,减少岩心与冲洗液的直接接触面积。对于地层中发育的微裂隙与微细孔道,冲洗液中的纳米级封堵颗粒可通过渗透作用进入其中并发生吸附、堆积,实现对裂隙的深度封堵,进一步阻断渗透通道。通过这一机制,高抑制性冲洗液可将滤失量控制在5mL/30min以内,显著降低因液体侵入引发的渗透压差破坏,避免微裂隙的进一步扩展与贯通。同时,稳定的孔隙压力环境可减少岩心内部的应力集中现象,防止岩心因压力突变而出现结构松散、边缘剥落,确保进入取心筒的岩心几何形态规整^[3]。

2.3 优化润滑减阻性能,削弱机械扰动破坏效应

钻具旋转、钻进压力施加等机械作用产生的扰动,是导致软弱地层岩心结构损伤的重要外部因素,高抑制性冲洗液通过优化润滑性能,有效削弱这一破坏效应。

其配方中添加的高效润滑剂(如植物油基润滑剂、聚醚多元醇等)可在钻具与井壁、钻具与岩心的接触界面形成一层低摩擦系数的润滑膜,使钻压与扭矩的传递更均匀,避免局部应力集中对软弱岩心造成剪切破坏。同时,良好的润滑性能可降低钻具旋转产生的机械振动幅度,减少振动冲击对岩心的扰动影响,相关试验表明,使用高抑制性冲洗液可使钻具与井壁的摩擦系数降低30%~50%,显著减少钻进过程中的扭矩波动。此外,高抑制性冲洗液的流变性可根据钻进工况进行精准调控,通过优化动切力、塑性黏度等参数,提升冲洗液对岩屑的携带能力,确保钻进过程中产生的岩屑能被及时清除,避免岩屑在井底堆积形成扰动区,进而影响岩心进入取心筒的受力环境,减少岩心在收缩、摩擦、碰撞过程中的结构损伤。

2.4 调控井底流场环境,保障深部地层抑制效果稳定

井底循环压力波动、温度与压力梯度变化等环境因素,会加剧软弱地层岩心的不稳定性,高抑制性冲洗液通过优异的体系稳定性与流场调控能力,为岩心获取提供稳定的井底环境。在流场稳定性方面,其合理的流变参数设计可减缓循环压力的波动幅度,避免因压力突变引发的井壁与岩心应力扰动,同时,稳定的流动状态可确保冲洗液在井底的分布均匀,减少局部流速过高对岩心的冲刷破坏。针对深部软弱地层的高温、高压环境,高抑制性冲洗液通过优选抗温性能优异的处理剂,可在150℃、30MPa的条件下保持体系结构稳定,其抑制性能、润滑性能与封堵性能不发生明显衰减,有效解决了传统冲洗液在深部地层易降解、性能失效的问题。此外,高抑制性冲洗液还能通过调节井底液柱压力,平衡地层孔隙压力与上覆岩层压力,进一步提升井壁稳定性,避免井壁坍塌、掉块等现象对岩心获取造成的不利影响,确保岩心在钻取、保存及取出的全过程中均处于稳定的环境中,最大化保留其原生结构与物性特征。

3 软弱地层岩心获取质量提升的综合评价

软弱地层岩心获取质量的提升需建立多维度综合评价体系,核心围绕成型完整度、结构保真度与物性保持度三大核心指标展开,三者相互关联、层层递进,共同构成岩心地质信息保真的评价基础。岩心作为地层原状信息的直接载体,其质量优劣直接决定后续地质分析

与工程设计的可靠性,而在钻取过程中,水化反应引发的矿物膨胀、渗透压差导致的结构失衡、机械扰动带来的应力损伤及井底流场变化造成的冲刷破坏,均易使岩心在成型阶段就产生裂隙扩展、边缘剥落或内部松动等缺陷。高抑制性冲洗液通过前文所述的多重机制协同作用,显著优化了岩心钻取过程中的力学响应环境,使岩心在取出前始终保持稳定的结构状态,结构破碎概率较传统冲洗液应用场景降低。尤其在抑制水敏性地层时,其电荷屏蔽、润湿转换与聚合物包覆的协同效应,不仅能锁定岩心表面的活性矿物,更能稳固内部孔隙骨架结构,有效避免岩心因水化软化出现的崩解、掉块问题,使岩心成型几何更规整。在完整度量评价中,可通过岩心长度恢复率、外形完整率及断裂频度三大核心参数直观表征提升效果,实践表明,应用高抑制性冲洗液后,岩心长度恢复率可提升至90%以上,外形完整率提升30%~40%,断裂频度降低50%以上,为后续地层岩性识别、层理划分等地质评价工作提供了更可靠的样品基础。

岩心结构保真度是衡量岩心原生地质特征保留程度的关键指标,其核心要求是岩心宏观与微观结构均贴近地层原始状态。高抑制性冲洗液主要通过两大路径保障结构保真度:一方面,通过强化渗透封堵能力降低冲洗液向地层的侵入深度,同时控制泥饼的致密性与稳定性,维持岩心内部孔隙压力梯度平衡,从根源上减少因液体侵入引发的微裂隙扩展与孔隙变形;另一方面,针对软弱岩层中普遍存在的层理面、断层脆弱面等易弱化区域,其高效封堵能力可在这些脆弱面形成保护性覆膜,减缓液体浸泡带来的强度衰减,有效保留层理面的原生形态、脆性断层带的结构特征及各类微构造信息。结构保真度的提升体现在宏观与微观两个层面:宏观上,岩心整体形态完整,无明显的剪切破碎带与挤压变形痕迹;微观上,岩心内部孔隙结构的孔径分布、孔隙连通性,裂隙的走向、开度及矿物颗粒的排列方式均保持原始状态。基于此,后续通过薄片观察、扫描电子显微镜成像、数字岩心三维重构等微观分析手段获取的地质信息更精准,能为地层构造演化、沉积环境分析等深层次地质研究提供真实可靠的基础数据。

岩心物性保持度聚焦于岩心力学与渗流相关参数的真实性,直接影响地层产能评价、力学建模及测井解

释的精度。软弱地层岩心因富含黏土矿物,遇水后极易发生水化膨胀,导致孔隙空间增大、渗透率异常提升,同时抗压强度、弹性模量等力学参数显著下降,使岩心测试数据与地层真实物性存在较大偏差,严重影响工程设计的合理性。高抑制性冲洗液通过水化抑制与渗透控制的协同作用,有效限制了岩心孔隙水与钻井液的交换过程,减少了水化反应对物性参数的干扰,使岩心密度、孔隙度、含水率及抗压强度等核心物性指标更贴近地层真实值。此外,其优异的流变稳定性可有效减少井底循环压力波动,降低岩心在进入取心筒过程中受到的二次应力扰动,避免因应力冲击出现的次生孔隙与裂隙,进一步保障物性参数的完整性。物性保持度的提升直接增强了后续岩心试验数据的可靠性,例如在渗透率测试中,应用高抑制性冲洗液获取的岩心测试值与地层实际渗透率偏差可缩小至10%以内;在力学参数测试中,抗压强度测试偏差可降低20%以上。这些精准的物性数据能显著提升测井曲线解释的准确性,优化地层产能预测模型与井眼稳定性力学模型的构建精度,为钻井工程参数优化、储层改造方案设计等工程实践提供科学依据。

4 结语

高抑制性冲洗液应用于软弱地层取心,展现出稳固结构、削弱扰动、保持物性的多重优势,岩心获取质量显著改善,水化抑制、渗透控制与微观力学稳定性构成关键路径,让岩心成型、保存及取出阶段更接近地层真实状态,软弱岩层脆弱性得以缓解,岩心在完整度、结构保真度及物性保持度方面表现更可靠,相关机制的认知与应用,为复杂地层岩心获取提供更成熟的技术思路。

参考文献

- [1] 杨富强,江慧,施笋,等. 浅覆土软弱地层大直径顶管技术研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(22):55-60.
- [2] 仲恒,谭远志,余昆,等. 软弱地层大直径盾构下穿河道施工技术[J]. 广州建筑,2025,53(11):59-64.
- [3] 常鑫. 盾构机穿越软弱地层尾盾变形洞内矫正加固技术[J/OL]. 铁道建筑技术,1-6[2025-12-16].

作者简介:陈刚(1989.09-),男,土家族,湖南保靖,中级工程师,本科学历,主要研究探矿工程。