

# 钻井利器之“护壁堵漏材料”

王 胜<sup>1</sup>, 欧兴贵<sup>2</sup>, 解程超<sup>1</sup>, 袁长金<sup>3</sup>, 李之军<sup>1</sup>, 袁进科<sup>1</sup>, 谭慧静<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 贵州地矿基础工程有限公司, 贵州 贵阳 550000;

3. 四川蜀都地质工程勘察有限公司, 四川 成都 610100)

**摘要:**近年来,作为入地最为关键手段的钻探所面临的地层越来越复杂,钻孔垮塌、掉块、缩径和超径等事故发生概率增加,严重制约了钻探工程质量与效率的提升。护壁堵漏材料是钻探工程不可或缺的关键性工程材料,护壁堵漏技术则是保证钻进工作安全、快速以及持续进行的重要技术环节,是复杂地层钻孔处理的主要内容。本文从科普的角度介绍了护壁堵漏材料的基本概念与组成、冲洗液护壁堵漏作用、水泥基材料护壁堵漏作用、护壁堵漏材料的进一步发展空间等,以期加深对护壁堵漏材料的认识,促进新型护壁堵漏材料的研发和应用。

**关键词:**钻探工程;冲洗液;水泥基材料;护壁堵漏

**中图分类号:**P634.6;TE254 **文献标识码:**C **文章编号:**2096-9686(2024)03-0157-05

## The story of a drilling weapon: Wall protection and plugging materials

WANG Sheng<sup>1</sup>, OU Xinggui<sup>2</sup>, XIE Chengchao<sup>1</sup>, YUAN Changjin<sup>3</sup>, LI Zhijun<sup>1</sup>, YUAN Jinke<sup>1</sup>, TAN Huijing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China;

2. Guizhou Geological and Mineral Foundation Engineering Co., Ltd., Guiyang Guizhou 550000, China;

3. Sichuan Shudu Geological Engineering Survey Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610100, China)

**Abstract:** In recent years, as the most important means to access into the earth, drilling is facing the problems that the formation is becoming more and more complex, and the probability of drilling collapse, falling blocks, diameter reduction and over-diameter accidents is increasing, which seriously restricts the improvement of the quality and efficiency of drilling engineering. Wall protection and plugging material is an indispensable key engineering material for drilling engineering and the wall protection and plugging technology is an important technical link to ensure safe, fast and continuous drilling work and is the main content of drilling treatment in complex formations. From the perspective of science popularization, this paper introduces the basic concept and composition of wall blocking materials, the wall blocking effect of flushing fluid and cement-based materials and the further development space of wall blocking materials, so as to deepen the understanding of wall blocking materials and promote its R&D and application.

**Key words:** drilling engineering; flushing fluid; cement-based materials; wall protection and plugging

## 0 引言

钻探工程技术被称为我国的“第五大发明”,发展至今,其服务领域已不仅限于资源勘查、地质勘

探,在岩土与地基工程、地质灾害治理、地质灾害救援、地质环境保护、地下管网铺设、国防工程、地球科学研究等领域也发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。钻探作为一

收稿日期:2023-12-11;修回日期:2024-02-29 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.03.021

第一作者:王胜,男,土家族,1982年生,钻探教研室主任,教授,地质工程专业,博士,长期从事钻探新工艺与新材料的科研与教学工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,yongyuandewangsheng@sina.com。

通信作者:欧兴贵,男,汉族,1981年生,钻探工程专业,长期从事基础施工、岩土勘察的一线生产与管理工,贵州省贵阳市观山湖区金阳北路3号附1号正汇大厦,997004035@qq.com。

引用格式:王胜,欧兴贵,解程超,等. 钻井利器之“护壁堵漏材料”[J]. 钻探工程,2024,51(3):157-161.

WANG Sheng, OU Xinggui, XIE Chengchao, et al. The story of a drilling weapon: Wall protection and plugging materials[J]. Drilling Engineering, 2024,51(3):157-161.

项具有高度风险的隐蔽性工程,常常遭遇以坍塌、漏失为主体的复杂地层,钻孔缩径、孔壁垮塌以及浆液漏失问题十分常见,处理不当往往容易引起卡钻、埋钻等钻孔事故,严重情况可能导致钻孔直接报废,极大程度上制约了钻探质量和效率<sup>[2]</sup>。护壁堵漏材料主要包括冲洗液、水泥浆液、化学浆液、惰性材料等,为对各种孔内复杂事故进行及时有效地预防和处理,护壁堵漏材料应运而生。

### 1 护壁堵漏材料——从“血液”到“护甲”

地质岩心钻探中对“护壁堵漏”的定义是指利用冲洗液、水泥浆液、化学浆液、惰性材料、套管等保持、维护孔壁稳定,封堵钻孔漏失通道<sup>[3]</sup>。在工程实际中,因考虑到经济适用性等多方面的原因,各种类型的冲洗液与水泥浆液仍是目前应用最为广泛的护壁堵漏材料。冲洗液是指在钻探过程中通过循环作用将钻进工作产生的岩屑冲洗出来的一种介质<sup>[4]</sup>。在钻探工作早期,多直接采用粘土与水混合以制得冲洗液。因此,业内人员也常将冲洗液习惯性地称作泥浆(图1)。

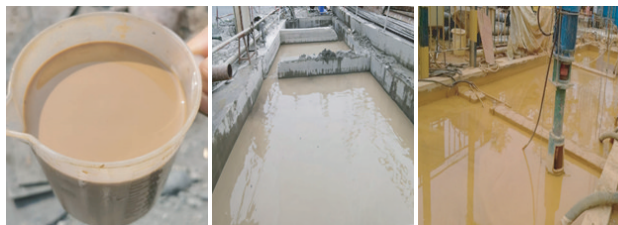


图1 泥浆及泥浆池

Fig.1 Mud and mud pit

若将钻孔比作人的躯干,冲洗液则可视作为循环流通于人体中的“血液”。人体血液约占人体质量的10%,但却遍布整个躯体,因此其可直接影响人体生命的整体性。与血液类似,冲洗液同样贯穿于整个钻探过程。在钻进过程中,冲洗液与地层直接接触,冲洗液与地层之间的相互作用将直接影响孔壁稳定。因此,与血液指标对人体健康的影响类似,冲洗液的各项性能对保持、维护孔壁稳定具有不可替代的作用。在钻进作业现场,现场工程师会根据钻遇地层的实际条件对冲洗液的各项性能进行调整,以尽量给出最为经济适用的冲洗液配方。然而,由于地质条件千变万化,某些地质条件下孔壁失稳问题让经验丰富的钻探工程师也束手无策。

例如,当钻遇严重破碎、宽大裂隙、大溶洞以及严重漏失、涌水、坍塌等极端复杂地层时,利用冲洗液来护壁已经难以发挥作用。类似于人体内的血管出现严重破裂、梗阻时,血液已经无法正常循环,此时必须寻求途径彻底解决以修复血管。经过多年的现场经验总结,水硬性胶凝材料被视为修复地层的理想型材料,其中各种水泥浆液是目前现场应用最为广泛的护壁堵漏材料。水泥基护壁堵漏材料进入地层后,可以有效封堵、固化地层裂缝,进而将严重破碎的地层胶结成一个整体,阻止冲洗液恶性漏失<sup>[5]</sup>。水泥基护壁堵漏材料进入钻孔后,类似于给孔壁装上了一层可靠的“护甲”,因此可将其形象地称之为钻探的“护甲”。

### 2 钻探“血液”——冲洗液护壁堵漏

与人体躯干的血液循环过程类似(图2),冲洗液由专业的冲洗液工程师在地面进行配制,再利用钻探的“心脏”——泥浆泵提供的动力泵入孔内,然后从钻头水口高速喷出,最后通过钻杆与钻孔之间的环空间隙上返至地面。冲洗液在循环过程中,不断与地层相互作用,这种相互作用的过程实际上便是冲洗液发挥护壁堵漏作用的过程。

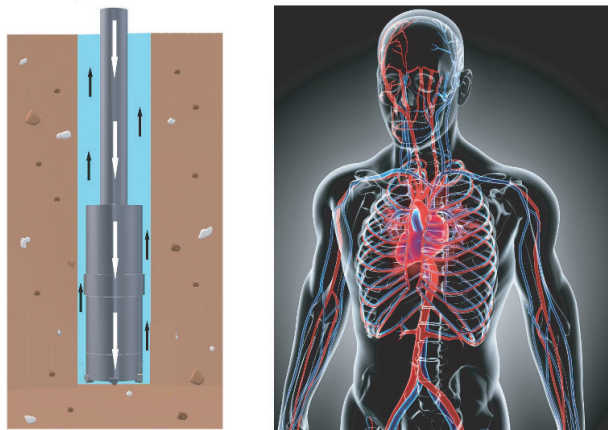


图2 冲洗液循环与血液循环

Fig.2 Circulation of flushing fluid and blood

冲洗液的滤失造壁能力是影响孔壁稳定性的一项关键性能,特别是对于松散、破碎以及遇水失稳地层等复杂性地层,这项性能更显得尤为关键。实际钻进过程中,孔壁岩石均存在一定程度的裂隙或孔隙,在压力差的作用下,冲洗液中的自由水将不断向地层内进行渗透,同时冲洗液中的固相颗粒

也会不断附着至孔壁上形成渗透性较小的滤饼。在滤饼作用下,冲洗液进入地层的速度将大幅度减缓,直到达到一个相对稳定的动态滤失过程,这便称之为冲洗液的滤失造壁性。冲洗液滤失造壁能力的强弱主要是通过冲洗液滤失量的大小以及其形成滤饼的质量来衡量。滤饼的质量对于保证孔壁稳定性具有显著的积极意义,质量良好的滤饼可以大幅度减少液相渗入地层内,从而减轻水敏地层的水化分散,保证钻进安全。通常,水敏性地层宜选用无固相或低固相冲洗液护壁,纤维素类、淀粉类、水解聚丙烯腈类等处理剂常用于调控此类冲洗液的各项性能。此外,在一些松散破碎地层,则宜选用分散冲洗液进行护壁,此类冲洗液的主要组分除了纤维素类、淀粉类等处理剂以外,往往还需要添加改性沥青、乳化沥青、随钻循环堵漏剂、超细碳酸钙等具有胶结封堵功能的处理剂<sup>[6]</sup>。

另外,冲洗液的另一重要功用是通过其液柱压力来平衡地层压力。针对不同的地层情况,往往通过动态调整冲洗液的密度以确保其静液柱压力可以有效平衡地层的孔隙压力,从而减少孔壁坍塌、掉块等。有时也通过调节冲洗液的密度来平衡地层构造压力,以避免塌孔的发生。冲洗液的密度是影响孔壁稳定性的一个重要指标,如果密度过高,则冲洗液会过稠,容易增加漏失风险,对孔壁稳定性不利。此外,过高的密度也会造成钻速下降,并且不利于冲洗液的成本控制。如果冲洗液密度过低,则容易出现孔塌、孔径缩小以及携岩能力下降等问题。因此,在实际钻进过程中,要求具有丰富经验的工程师能够准确、合理的设计冲洗液的密度范围,并且在钻进过程中需要对冲洗液的密度随时进行检测及调整。往冲洗液体系中适当添加重晶石等加重材料是增加冲洗液密度最为常用的方法。在加重前,应该调整好冲洗液的各项性能,特别是低密度固相的含量。一般情况下,冲洗液预期所需要的密度越高,则加重前冲洗液的固相含量、粘度及切力等则需要控制得越低。在部分平衡压力钻进或欠平衡钻进中,有时候则需要适当降低冲洗液的密度。目前,降低冲洗液密度最主要的方法是通过机械处理和化学絮凝的方法以清除无用固相,从而降低冲洗液的固相含量,以达到降低冲洗液密度的目的。

虽然在实际钻进作业中冲洗液成本通常只占

钻探总成本的7%~10%,但优质的冲洗液往往可以大幅度减少孔内复杂情况的发生,从而提高钻探效率,节约作业成本,保护生态环境。随着钻探面临的环境日趋复杂,钻探工艺的不断革新,对冲洗液质量的要求则越来越高,对优质冲洗液的需求量也越来越大。优质冲洗液的配制离不开相应的冲洗液材料,一些新兴的冲洗液材料不断被尝试进入冲洗液体系中,例如纳米材料<sup>[7]</sup>、耐高温材料<sup>[8-10]</sup>、绿色环保材料<sup>[11-12]</sup>等。因此,冲洗液的作用不容忽视。

### 3 钻探“护甲”——水泥基材料护壁堵漏

当人体躯干的血管严重破损、堵塞时,血液便无法正常循环。类似地,在某些复杂地质条件下(图3),冲洗液漏失严重,已经无法正常发挥作用。例如,在钻遇严重破碎地层时,即使防塌型冲洗液也难以维护孔壁稳定,钻孔易塌孔,造成钻孔“大肚子”、卡钻埋钻;在钻遇宽大裂隙地层时,冲洗液恶性漏失,基本无法发挥护壁作用,同时增加钻探成本;在钻遇动水地层时,孔壁稳定性极差,同时,由于地下水大量侵入钻井液,冲洗液各项性能也无法满足护壁需求。

针对上述复杂情况,则需要利用水硬性胶凝材料来实现钻进过程中的护壁堵漏需求。水泥基护



图3 某钻探现场典型孔壁坍塌漏失地层

Fig.3 Typical wall collapse and leaking formation in a drilling site

壁堵漏材料因材料来源广泛、经济适用性好,常常被钻探工作者们用作极端复杂环境下的钻孔护壁堵漏材料。水泥基护壁堵漏材料因其自身的胶凝特性,可在复杂地质条件钻探过程中充当“护甲”作用,以封堵、固化松散破碎地层,保证复杂地层下钻探工作的顺利进行。用水泥进行护壁堵漏是指将水泥浆液通过钻杆注入孔内,使之进入目标区域。待其凝固后,地层裂隙被有效封堵,破碎的地层被胶结成一整块岩体,这时即可下放钻具继续钻进。通常要求用于钻孔护壁堵漏的水泥浆液需具备流动性良好、初凝时间适当、初终凝时间间隔短、强度增长快、早期强度高、低失水、低析水、适当的渗透性以及抗腐蚀性等特点。实际工程中,水泥类型需要通过护壁堵漏要求、地层条件以及水质条件综合确定,一般常选用的水泥类型包括硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥和油井水泥等。大多数正常情况下,使用普通硅酸盐水泥浆液,通过添加高效减水剂和早强剂等外加剂调节其性能,即可满足使用要求。但在极端温度条件下,如极低温条件下,水泥浆液凝结硬化缓慢,耽搁钻探工程施工进度。经过长期研究发现,将普通硅酸盐水泥和硫铝酸盐水泥按一定比例配制成复合水泥,通过一定的外加剂调控其性能,可以满足极端温度下的钻孔护壁堵漏要求。基于此,成都理工大学钻探教研室研制了抗低温复合水泥<sup>[13-15]</sup>、抗高温玄武岩纤维复合水泥<sup>[16-18]</sup>,现场应用效果良好(图4)。

#### 4 护壁堵漏材料研究任重道远

钻探工程技术在经济社会发展过程中扮演着重要角色,钻探工程中的护壁堵漏材料也成为了研究重点,研究人员从配方、原料、工艺等方面开展了长期而广泛的研究,取得了一系列研究成果。但面对日趋复杂的钻探地质环境和不断革新的钻探施工工艺,在以下几个方面仍有进一步研究和发展的空间。

(1)高性能低成本护壁堵漏材料需要进一步开发。钻探工程降本增效之路会持续不断,因此,如何实现护壁堵漏材料的高性能、低成本就显得非常重要。现阶段的部分护壁堵漏材料仍难以兼顾低成本与高性能需求,在一定程度上制约了该类材料在工程实际中的广泛应用。

(2)特殊地质条件下的护壁堵漏材料体系需要



图4 某钻探现场水泥基材料护壁堵漏

Fig.4 Wall protection and plugging situation using cement-based flushing fluid in a drilling site

进一步完善。大陆科学超深钻探、极端严寒天气冻土层钻探、大洋深水钻探所面临的超高温、超低温以及盐水环境对护壁堵漏材料性能提出了更高的要求。同时,护壁堵漏材料在此类极端恶劣环境下的性能稳定性仍需得到进一步研究。

(3)护壁堵漏材料的环保性需要得到进一步关注。随着国家对于生态环保工作力度的加强,以及极地、高原、海洋等生态脆弱地区钻探工作的大力开展,实现钻探全过程的“绿色化”、“生态化”是钻探行业转向高质量发展的必经之路。如何尽量减轻钻探作业对环境的影响,如何构建真正意义上的环保型护壁堵漏材料体系,是值得进一步思考的关键性问题。

因此,为实现钻探工程行业优化改造升级以及高质量发展,需要我们更多的研究人员投身进来,不断构建和完善高性能、低成本、环保性的新型护壁堵漏材料体系,为向地球深部进军的战略目标保驾护航。

#### 参考文献(References):

[1] 王达,李艺,周红军,等.我国地质钻探现状和发展前景分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(4):1-9.

WANG Da, LI Yi, ZHOU Hongjun, et al. Analysis of the cur-

- rent situation and development prospect of geological drilling in China [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(4): 1-9.
- [2] 王扶志, 张志强, 宋小军. 地质工程钻探工艺与技术 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2008.  
WANG Fuzhi, ZHANG Zhiqiang, SONG Xiaojun. *Geological Engineering Drilling Process and Technology* [M]. Changsha: Central South University Press, 2008.
- [3] DZ/T 0410—2022. 地质钻探护壁堵漏技术规程 [S].  
DZ/T 0410—2022. Code of practice for wall protecting and leakage plugging in geological drilling [S].
- [4] 鄢捷年. 钻井液工艺学 (修订版) [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2012.  
YAN Jienian. *Drilling Fluid Technology* [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2012.
- [5] 张川. 硅酸盐—硫铝酸盐复合浆液灌注性能与水化协同效应研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2016.  
ZHANG Chuang. Research on grouting performances and hydration synergy effect of silicate-sulphoaluminate compound system [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [6] 乌效鸣, 蔡记华, 胡郁乐. 钻井液与岩土工程浆材 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2014: 326.  
WU Xiaoming, CAI Jihua, HU Yule. *Drilling Fluids and Geotechnical Slurry Material* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014: 326.
- [7] 刘徐三. 纳米材料对低固相冲洗液性能影响的研究 [J]. *钻探工程*, 2022, 49(4): 61-67.  
LIU Xusan. Influence of nanomaterials on the properties of low-solid drilling fluids [J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(4): 61-67.
- [8] 蒋炳, 严君凤, 张统得. HTD-3型高温堵漏材料研制及性能评价 [J]. *钻探工程*, 2022, 49(1): 57-63.  
JIANG Bing, YAN Junfeng, ZHANG Tongde. Development and performance evaluation of HTD-3 high temperature plugging material [J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(1): 57-63.
- [9] 吴雪鹏. 耐高温多元插层膨胀石墨材料及其应用研究 [J]. *钻探工程*, 2023, 50(3): 66-73.  
WU Xuepeng. Introduction and application of high temperature resistant multi-component intercalated expanded graphite material [J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(3): 66-73.
- [10] 邹志飞, 熊正强, 李晓东, 等. 耐 230 °C 高温海水钻井液室内实验研究 [J]. *钻探工程*, 2022, 49(1): 49-56.  
ZOU Zhifei, XIONG Zhengqiang, LI Xiaodong, et al. Laboratory research on 230 °C high temperature-resistant seawater-based drilling fluids [J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(1): 49-56.
- [11] 李冰乐, 王胜, 袁长金, 等. 复杂山区水平绳索取心定向钻进聚合醇绿色防塌冲洗液研究 [J]. *钻探工程*, 2023, 50(6): 86-92.  
LI Bingle, WANG Sheng, YUAN Changjin, et al. Research on polymer alcohol anti-collapse flushing fluid for directional drilling of horizontal wire-line coring in complex mountain areas [J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(6): 86-92.
- [12] 李田周, 陶士先, 熊正强. 磷石膏地层用钙基成膜环保冲洗液研究与应用 [J]. *钻探工程*, 2023, 50(1): 49-54.  
LI Tianzhou, TAO Shixian, XIONG Zhengqiang. Development and application of calcium-based film-forming environment-friendly drilling fluid for phosphogypsum formation [J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(1): 49-54.
- [13] 华绪. 纳米复合水泥浆液低温流变/凝固特性与水化过程研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2019.  
HUA Xu. Low temperature rheology/solidification characteristics and hydration process of nano-composite cement slurry materials [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [14] 汪靖扉. 冻土钻探纳米复合水泥基护壁堵漏材料研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2018.  
WANG Jingfei. Study on nano-composite cement-based plugging and protecting material for drilling in frozen soil [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [15] WANG Sheng, JIAN Liming, SHU Zhihong, et al. Preparation, properties and hydration process of low temperature nano-composite cement slurry [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 205: 434-442.
- [16] WANG Sheng, WU Liyu, JIANG Gui, et al. A high temperature composite cement for geothermal application [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 195: 107909.
- [17] 陈绍华. 硅酸盐水泥的高温凝固特性及深孔护壁堵漏材料研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020.  
CHEN Shaohua. Study on high temperature solidification characteristics of portland cement and leak plugging material of deep hole wall [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [18] 王胜, 吴丽钰, 蒋贵, 等. 深孔纳米复合水泥基护壁堵漏材料研究 [J]. *钻探工程*, 2021, 48(12): 7-13.  
WANG Sheng, WU Liyu, JIANG Gui, et al. Research on deep-hole nanocomposite cement-based wall plugging materials [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(12): 7-13.

(编辑 王文)