

空气潜孔锤钻进典型事故原因分析及处理措施

宋继伟¹, 赵华宣², 苏宁³, 李奇龙³

(1.贵州省地质矿产勘查开发局 112 地质大队, 贵州 安顺 561000; 2.贵州省地质矿产勘查开发局 114 地质大队, 贵州 遵义 563000; 3.贵州省地质矿产勘查开发局, 贵州 贵阳 550008)

摘要:贵州省地质矿产勘查开发局就“贵州复杂地层深井钻探工艺应用研究”科研项目中“空气潜孔锤钻进技术”部分进行了试验研究,在试验过程中曾出现了锤头断裂、硬质合金齿折断、冲击器堵塞并阻卡、泥环包裹、卡埋钻、井眼弯曲等典型事故。详细分析了出现这些典型事故的原因,形成了避免和解决这些典型事故的系统技术措施。该成果经现场检验效果良好。本文对该成果进行了全面阐述,以期同类施工提供借鉴。

关键词:潜孔锤钻进;孔内事故;处理措施

中图分类号:P634.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)05-0022-07

Analysis on the Causes of Typical Accidents of Air DTH Hammer Drilling and the Treatment Measures/SONG Ji-Wei¹, ZHAO Hua-Xuan², SU Ning³, LI Qi-Long³ (1.112 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Anshun Guizhou 561000, China; 2.114 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Zunyi Guizhou 563000, China; 3. Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Guiyang Guizhou 550008, China)

Abstract: The research on “Air DTH Hammer drilling technology” was carried out by the Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, which was a part of the scientific research project of “Application research on deep well drilling technology in Guizhou complex strata”. During the test process, some typical accidents happened, such as the hammerhead fracture, hard alloy tooth fracture, impactor blockage and blocking, mud ring wrapping, drill pipe sticking & burying and borehole bending. The causes of these typical accidents are analyzed in detail, and the systematic technical measures to avoid and solve these typical accidents have been formed. The results are proved good through field inspection and this paper gives a comprehensive elaboration on this achievement in order to provide reference for the similar construction.

Key words: DTH hammer drilling; borehole accident; treatment measures

0 引言

贵州省地质矿产勘查开发局自 2014 年开始实施局地质科研项目“贵州省地热深井钻探技术攻关”,并以此为基础 2015 年申报并获取贵州省社会发展科技攻关项目“贵州复杂地层深井钻探工艺应用研究”,主要研究螺杆钻进技术、空气潜孔锤钻进技术、多工艺转换接力钻进技术、钻井液技术四大核心内容,最终形成了一套适合贵州省地质条件地热深井钻探施工并能显著提高钻井效率和经济效益的组合工艺技术体系。

其中“空气潜孔锤钻进技术”研究部分,共在 8 口地热井不同岩性地层进行了空气潜孔锤钻进试

验,井径 216~406 mm,最大试验深度 1507.21 m (带增压机)、1029.31 m (不带增压机),总试验进尺 4211.12 m。试验结果显示:地热深井采用空气潜孔锤钻进,机械钻速高,可大幅提高钻进效率、缩短施工周期、降低钻井成本。试验过程中,因地层复杂、设备机具配置不合理、操作技术不当,导致钻进工艺不适宜等原因,出现排屑效果不佳、井壁泥环、潜孔锤堵卡不工作、锤头异常损坏、掉块卡钻、垮塌埋钻等,严重影响钻进效率以及出现井内异常情况。经过分析研究,形成了避免和解决上述难题的技术措施。

收稿日期:2017-12-11

基金项目:贵州省科技计划项目“煤系非常规天然气(煤系气)富集规律研究”(编号:黔科合[2016]支撑 2807)

作者简介:宋继伟,男,汉族,1982 年生,高级工程师,地质工程专业,博士,主要从事钻探工程管理和工艺研究工作,贵州省安顺市西秀区西水路 57 号,343219784@qq.com。

1 锤头断裂

锤头断裂是空气潜孔锤钻进中的不正常现象,试验中共发生了 5 次锤头异常断裂事故(见表 1),

断裂率为使用 16 个锤头的 25%。锤头断裂后将无法继续钻进,严重影响了钻进效益,无形中增加了施工成本。

表 1 空气潜孔锤钻进试验锤头断裂数据统计

事故井名	井径/ mm	钻进地层岩性	钻进参数				进尺/ m	纯钻时 间/h
			钻压/kN	风量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	风压/MPa	转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)		
贵州省石阡湾塘地热井	315	韩家店砂质页岩	20~25	63.3	1.6~1.8	43	45.76	1.17
			20~25	63.3	1.7~1.8	43	63.47	1.97
贵州省凤冈永安地热井	315	金顶山砂质页岩	20~25	66.6	1.7~1.8	43	198.36	7.60
			20~25	66.6	1.7~1.8	43	88.41	7.50
贵州安龙金州农耕地热水资源勘查勘探井	216	粉砂岩、砂岩	10~20	76.4	2.8~3.9	25~30	547.83	27.14

1.1 原因分析

锤头断裂位置多发生在锤颈处,即锤头花键上端变径部位,见图 1。经分析引发锤头断裂常见原因有:



图 1 新锤头与断裂锤头对比

(1)锤头体本身质量不佳、应力集中、耐疲劳性、抗剪强度较低。从表 1 数据分析,5 个锤头钻进时间都不长、进尺较少、钻压也不大,其主要因素是锤头质量问题。

(2)钻压过大导致钻具弯曲及振动大,或地层软硬不均导致锤头工作不平稳,锤头所受扭矩持续的高频率变化,在多次交变冲击力和交变剪切应力的作用下锤头产生疲劳破坏而断裂^[1-4]。

1.2 预防和处理措施

(1)选用质量好的生产厂家,以减少因锤头质量而发生孔内事故。此外,为保证孔内安全必须对锤头质量严格检查,有条件最好使用探伤仪检查锤头是否存在微裂纹和气孔,严防有损伤的锤头入井。

(2)进入松散、溶蚀裂隙带、破碎带及软硬不均地层,提前调整钻进参数。

(3)地层情况不明时,先用小钻压钻进,然后再缓慢加压,使得钻进均匀平稳,避免用大钻压和高转速钻进。

(4)钻遇较软岩层时,应降低钻压,以防硬质合金齿吃入岩层过深,导致锤头所受扭矩瞬间增大。

(5)尽可能选用带防脱套的潜孔锤,以防锤头断裂时掉入井内。

(6)如若锤头断裂落入井底,应及时进行打捞。

2 锤齿折断

空气潜孔锤正常钻进过程中锤头齿磨损较小,大部分锤头齿损坏是因异常崩断,尤其位于锤头最外缘的齿最易崩断(如图 2 所示),当出现此种情况时钻进效率显著降低甚至无进尺。



图 2 锤齿崩断

2.1 原因分析

造成锤头柱齿异常崩断的主要原因大致分为地层、钻进技术参数和操作方法 3 个方面。

(1)地层因素。松软、松散、溶蚀裂隙发育、断层

破碎带、软硬不均,钻头井底工作不平稳,憋跳较严重,局部柱齿瞬间受剪切力过大及受力不平衡而造成崩齿^[5-6]。

(2)钻进技术参数。造成柱齿崩断的钻进技术参数是钻压和转速。钻压的主要作用是保证锤头齿与井底岩石紧密接触,在裂隙及软硬不均岩层钻进时,由于硬质合金齿吃入岩层不同,回转阻力增大,钻进速度不均匀,硬质合金齿所受扭矩和剪切力间歇性增大而造成断齿、崩齿^[7-8]。

(3)操作不当。下钻过猛、蹾钻崩断硬质合金齿;加压过猛、送钻不均匀、遇裂隙时未能及时减少钻压、降低转速,使锤头工作不平稳造成崩齿。

2.2 技术措施

(1)提前调整钻进技术参数。当钻遇松散、溶蚀裂隙带、破碎带及其它不利地层时,要作好预测,提前调整好钻进技术参数。

(2)小钻压试。地层情况不明时,先用小钻压钻进,而后再逐渐加压,不允许使用大钻压和高转速钻进,以免出现孔内异常。

(3)小钻压、低转速。遇松散、裂隙带较多的层位,应及时提钻和调整钻压、转速;检查锤头是否断齿,若发现有断齿及时捞取,防止造成更严重的硬质合金齿崩断。

(4)均匀给压。严格按照潜孔锤钻进操作规程,给压过程应缓慢,钻进应均匀平稳。

(5)选择适宜锤头。钻进破碎裂隙带以及岩性多变岩层,宜选用平底型锤头钻进,有利于锤头工作更加平稳,合金齿受力均衡。

3 潜孔锤堵塞

潜孔锤堵塞是指潜孔锤使用过程中异物进入,导致潜孔锤不能正常工作,这是潜孔锤钻进过程中常见故障。轻微堵塞会出现通风不畅、工作不正常、钻进效率降低,严重堵塞时送不进风、使得风压升高和潜孔锤不工作。一般分为落物堵塞和井底窜屑堵塞^[9-10]。

3.1 落物堵塞潜孔锤原因及解决措施

3.1.1 原因分析

落物堵塞是由于入井钻具及地面管路不清洁、内壁有附着物,尤其新钻杆内壁的铁锈、微小杂物,在压缩空气作用下脱落至潜孔锤上端堵塞风道,致送风不畅或不过风。例如贵安CK1井开始采用空

气潜孔锤钻进时,就是选用了一批原地热井存放的 $\varnothing 89$ mm钻杆,虽然加杆时进行了简单敲击处理后才下钻,但钻进过程中在压缩空气的高速冲刷、钻柱震动作用下,钻杆内壁未清除的铁锈屑(岩屑)脱落聚集在潜孔锤逆止阀上端,堵塞通道使空压机气压异常升高,潜孔锤无法工作,如图3所示。

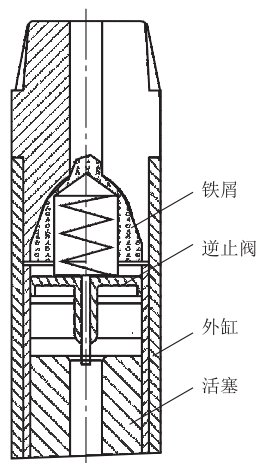


图3 落物堵塞潜孔锤示意图

3.1.2 解决措施

(1)首先对地面空气管路清理,尤其对闸阀及管路弯头难以清洗处尽可能拆开清理。一定要确保无异物。

(2)在下钻前对孔内钻具内壁进行彻底清洗,使钻具内壁保证干净入井。

3.2 岩粉倒吸堵塞潜孔锤原因及解决措施

3.2.1 原因分析

倒吸堵塞潜孔锤一般发生在井内余屑较多、特别呈“稠糊状”条件时,由于操作不当、下钻时插入“稠糊状”,当潜孔锤逆止阀密封不好、循环通道内外压差大,井底岩粉从潜孔锤配合间隙倒吸而为,如图4所示。

3.2.2 解决措施

(1)下钻前仔细检查潜孔锤逆止阀、更换已损坏零件。

(2)认真检查活塞和内(外)缸、活塞和配气阀的间隙及密封性能是否完好、更换已损坏零件。

(3)严格执行操作规程,避免因操作不当致岩粉倒吸堵塞。

(4)采用合理的钻具组合,可在钻具150~200 m处加接浮阀接头,以克服循环通道压差作用下产生的岩粉倒吸。



图 4 岩粉倒吸堵塞潜孔锤

(5)在送风不畅时,立即上下大幅度活动钻具,无效后应立即起钻检查。

4 潜孔锤阻卡

使用过程中出现潜孔锤阻卡多为较大粒径异物进入卡在零部件上,使得零部件运动受阻而不能正常工作。若轻微阻卡会增大零部件磨损、影响潜孔锤正常工作和降低钻进效率,严重阻卡会导致零部件不运动、风压异常升高和潜孔锤不工作。同样从性质上分为落物阻卡和井底窜屑阻卡^[11]。

4.1 落物阻卡潜孔锤原因及解决措施

4.1.1 原因分析

落物阻卡也是因入井钻具及地面管路不清洁、内壁有较大的粒径附着物(水泥固结时水泥块、岩屑等)、钻杆内落入其它大粒径杂物至潜孔锤上端卡在逆止阀部位,致逆止阀不能快速复位。例如贵安CK1井钻进时曾发生过2次水泥块阻卡;主要原因是入井的 $\varnothing 89$ mm钻杆在地热井水泥固井后未及时清理干净所为。如图5所示。

4.1.2 解决措施

潜孔锤阻卡多因落物和岩屑倒吸引起,一旦发生解卡可能性很小,就需要立即起钻拆卸潜孔锤进行清理修复工作。

(1)认真检查、清洗入井钻具,确保钻具内壁无杂物。

(2)定期检查潜孔锤逆止阀密封性和弹簧复位性能,对易损部件及时更换。

(3)仔细检查潜孔锤各部件(磨损情况、配合间隙、有无变形、毛刺等)。

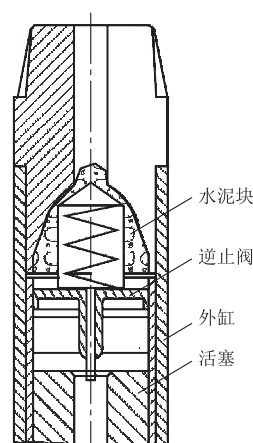


图 5 水泥块卡潜孔锤

(4)采用专门注油器,保证潜孔锤工作时正常润滑。

(5)每次加接钻杆前必须充分排渣。

(6)对用于水泥固井的钻杆要严格清洗并进行标识,尽量不用此类钻杆,若要使用时采用严格的清洗检查措施,以保证施工顺利进行。

4.2 岩屑倒吸阻卡潜孔锤原因及解决措施

4.2.1 原因分析

岩屑倒吸阻卡潜孔锤是钻具内外压力不平衡,在内外压力差的作用下井底未彻底排净的岩屑进入潜孔锤内,将活塞、锤头花键卡死或排气通道堵塞,见图6、图7所示。尤其是井内涌水时,钻具内外形成较大的压力差,岩屑很容易倒吸将潜孔锤卡死。当活塞及锤头阻卡后,活塞的冲击能量明显降低甚至不能正常工作,钻进效率也明显降低甚至不进尺,而且气压也出现异常升高。

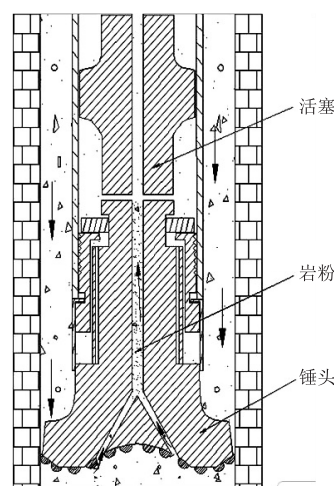


图 6 岩屑倒吸阻卡潜孔锤示意



图7 锤头花键卡塞

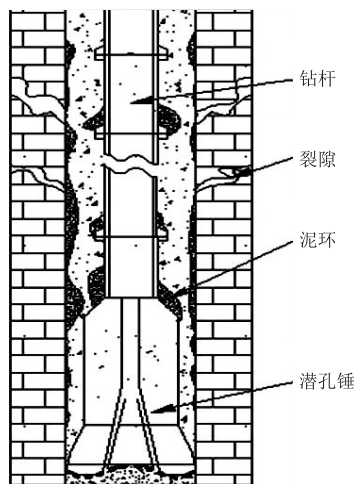


图8 井内泥环形成示意图

4.2.2 解决措施

(1)下钻前仔细检查潜孔锤逆止阀,更换已损坏零件。

(2)认真检查活塞和内(外)缸、活塞和配气阀的间隙及密封性能是否完好,更换已损坏零件。

(3)严格执行操作规程,防止因操作不当致岩屑倒吸堵塞。

(4)采用合理的钻具组合,同样借用在钻具150~200 m处加接浮阀接头的方法,解决岩屑倒吸。

(5)勤排屑,减少井底余屑。

5 泥环包裹

泥环包裹是岩粉(屑)粘附于钻具表面或井壁上形成泥环并包裹钻具。泥环形成后,环状空间变小,岩屑排除不畅继续聚集泥环处形成泥包,严重时完全堵塞井眼,造成粘埋钻事故。泥环多形成于钻具外径变化的地方,如锤头上部、潜孔锤与钻铤连接处、钻铤与钻杆连接处、钻杆接头处,这些地方空气上返流速变化,极易形成泥环。井内有泥环形成主要表现是:上返的岩屑明显减少且湿润,气压升高,钻速下降,上提有明显阻力^[12-13],有条件时加注泡沫剂。

5.1 原因分析

井内泥环形成有地层因素和工艺因素。地层因素:微涌水及潮湿地层,地层微小涌水在井壁形成液膜和使岩粉潮湿,井壁液膜与岩粉相互粘结成岩屑团,岩屑团不能完全被空气带出井筒时在井壁、锤头处粘附聚集形成泥环,而且泥团粘附聚集成泥环现象尤为严重。如图8所示。

工艺因素主要为设备配置、钻具组合、钻进工艺及操作因素。

(1)设备配置不足,供风量偏小、上返风速达不到排砂要求,岩屑不能及时排出而堆积粘附形成泥环。

(2)钻具选择及组合不合理,使用的钻铤、钻杆外径小,环状空间大,相同风量下上返风速降低而影响排砂;钻柱上加扶正器会对排砂造成一定的阻挡,导致在扶正器位置更易形成泥环。

(3)钻进工艺不当:如干空气钻进遇潮湿、小涌水地层,未及时更换钻进工艺,致井内泥环形成。

(4)操作不当:当钻遇软弱层、裂隙破碎带时,钻速加快,而风量又不足时,短时间内井内堆积大量岩粉形成泥环。提钻加杆前未能充分排砂,孔壁、钻具上仍有残留岩粉未排净,在后续钻进过程中持续粘附堆积形成泥环。

5.2 解决措施

钻进过程中井内出现泥环,应及时分析判断泥环形成的原因,并采取有效的技术措施。

(1)更换钻进工艺。钻遇地层潮湿、少量渗水,灰岩、白云岩等岩层采用雾化钻进(注水稀释)。雾化液(泡沫液)有发泡、吸附、润湿反转等作用,起到将遇水粘结成的钻屑团和粘附井壁的钻屑分离,防止液滴聚集,使循环系统气液固分布均匀,有效阻止钻屑堆积现象再发生,增强空气流的举屑、携水能力等效果。雾化液注入量应根据地层涌水量,以确保井壁和钻屑完全润湿、环空内流体呈雾状稳态流即可;水敏性的泥页岩地层,采取间断泡沫液稀释泥环、排砂,或泡沫钻进(并在泡沫液中添加抑制性、固

壁防塌性能处理剂)。如图 9 所示。

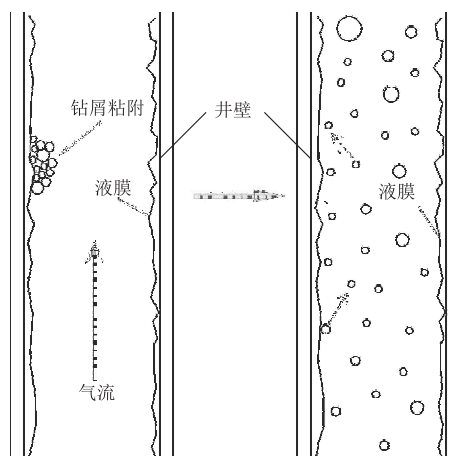


图 9 雾化解井壁泥环示意

(2)勤排屑。每钻进 0.5~1 m,钻具提离井底进行排渣,以利于钻效的提高,避免孔内事故的发生。

(3)增加空压机。增加供风量、提高上返风速,增强排砂效果。

(4)合理配置钻具。选用合理的钻铤、钻杆,减小环状空间、提高上返风速,使用斜坡钻杆,尽量避免在钻柱上加扶正器。

(5)短程起钻划井壁。防止井壁泥环形成及增厚,每 200~300 m 短程起钻划井壁清除井壁泥环。

6 卡、埋钻

卡钻、埋钻事故是井壁掉块、垮塌卡埋潜孔锤,致其失去活动空间的现象。钻具被卡、被埋表现:返砂量、返气量减少甚至失返,气压升高,钻具回转阻力增大,上提有阻力或无法上下活动。卡、埋钻事故发生后,处理难度较大,将延长钻井周期、增大机具的损坏和材料消耗、增加钻进成本。因此,应提前预测,采取合理技术措施,避免此类事故的发生。

6.1 原因分析

潜孔锤卡、埋事故发生的原因有地层方面和工艺技术方面^[14-15]。地层因素:地质构造、溶蚀、节理产生的裂隙及断层发育致岩体松散、胶结力弱,以及涌水致部分岩层吸水膨胀、崩解,井壁掉块、垮塌卡埋潜孔锤。工艺技术方面:钻进中高频震击破坏岩体整体结构、高速气流冲刷(剥离)破坏岩壁结构、循环介质无平衡护壁功能及涌水浸泡降低泥页岩结构力致掉块卡锤头、垮塌埋潜孔锤,如图 10 所示。

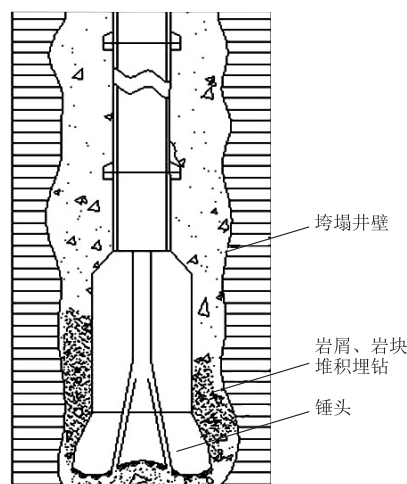


图 10 潜孔锤卡埋示意

6.2 技术措施

(1)勤观察。加强排屑口异常情况观察,钻屑变大、出屑减少、不返屑及扭矩变化较大时,调整钻进参数或停止钻进,判明情况后再恢复正常钻进。

(2)勤活动钻具。因故不能钻进时,勤活动钻具,活动范围 3~5 m,如遇特殊情况必须静止或停止循环时间较长时,应将钻具提到安全井段。

(3)及时停钻处理。钻进过程中,若气压突然上升或下降,应立即停止钻进,上下活动钻具,循环观察排屑口岩屑返出情况,正常后方可继续钻进。

(4)窜动解阻。上提钻遇阻卡,应反复上下活动钻具,直到畅通无阻后方可起钻。如果不能做到畅通无阻,则下钻时应在遇阻井段进行划眼。

(5)注泡沫剂强排屑解阻。起钻过程中遇阻,应上下窜动钻具且不可强提,如因大颗粒岩屑或掉块卡阻,加注泡沫剂强排屑并保持钻具活动,将掉块活动至井底碾碎排出。

(6)短起钻探井壁。每钻进 200~300 m 起钻探井壁,如井壁欠稳定、掉块多,解阻难度大,解阻后及时转换钻进工艺护壁钻进。

(7)泡沫钻进。地层涌水并存在水敏性地层,采用泡沫钻进,并在泡沫液中添加抑制性、固壁、防塌性能处理剂。

(8)换工艺护壁钻进。松散、胶结力弱地层、断层破碎带、裂隙带,井内掉块垮塌严重,此时锤头上部堆积有大岩块,应及时起钻更换钻进工艺。

(9)注泥浆护壁。井壁不稳垮塌致埋钻,窜动、提拉无效后,及时向井内注泥浆护壁(护未垮井段),以免造成更严重的井塌。

(10)套铣解卡。井壁垮塌严重致卡埋钻事故后,采用套铣解卡。

7 井眼弯曲

井眼弯曲即钻进过程井眼轨迹未按预计角度行走而发生异常变化,尤其在溶蚀裂隙带、岩层产状陡、软弱互层地层、软弱结构层,锤头在钻压作用下沿软弱面走斜,井眼轨迹发生偏移^[15],如图11所示。井斜弯曲过大,将引发钻具摩擦井壁、加剧井壁的不稳定、加快钻具磨损和后期下管困难等不良情况。

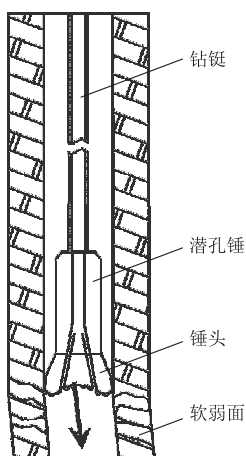


图11 井眼沿软弱面走斜示意

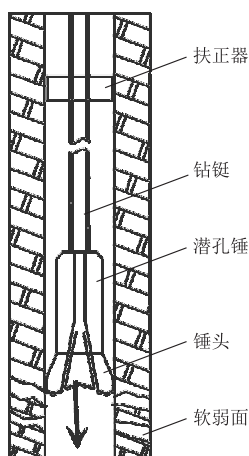


图12 扶正器导正

7.1 井眼弯曲的原因

(1)溶蚀裂隙带、软弱结构层,岩层软硬不均、岩石可钻性不一,钻进中锤头沿可钻性低的方向进尺快、井眼轨迹向软弱面走斜。

(2)钻具组合不合理,粗径钻具与井径级差大、粗径钻具(钻铤)刚度不足支撑钻进走斜的侧向力,井眼轨迹向软弱面走斜。

(3)操作不当,遇软弱结构面层钻进参数调整不及时或未调整,井眼轨迹向软弱面走斜。

7.2 解决措施

(1)及时调整钻进参数。钻遇溶蚀裂隙带、软弱结构层、岩层软硬不均地层,及时上提钻具减少钻压、降低转速(转速可调的钻机)。

(2)调整钻具组合。使用较大尺寸的粗径钻具(钻铤)减小钻具与井径的级差、提高钻铤刚性或使用扶正器导正。

(3)扶正器的扶正翼片方向应与钻具方向一致,

以减少排屑和上返气流的阻力。

8 结语

空气潜孔锤钻进主要以高频冲击破碎方式为主,往往能达到常规钻进方式10倍以上的钻进速度,但应用时受操作工艺、地层复杂等因素影响容易产生各类事故,影响钻进效率。空气潜孔锤钻进常见事故主要包括锤头断裂、合金齿崩断、堵塞、阻卡、泥环包裹、卡埋钻、井眼弯曲等,本文针对以上典型事故形成的系统技术措施,可操作性强,具有推广价值。

参考文献:

- [1] 冯涛,朱玉新.浅谈钻进过程中空气潜孔锤的使用[J].中州煤炭,2009,165(9):81-83.
- [2] 许刘万,史兵言,李国栋.大力推广气动潜孔锤及气举反循环组合钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,(9):41-45.
- [3] 胡郁乐,张惠,张秋冬,等.深部地热钻井与成井技术(第一版)[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2013:172-174.
- [4] 刘家荣,王建华,王文斌,等.气动潜孔锤钻进技术若干问题[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(5):40-43.
- [5] 卢予北.空气潜孔锤在云南红层中快速钻井工艺应用研究[J].地质与勘探,2011,47(2):309-315.
- [6] 苏宁,王虎,王剑,等.多工艺钻井技术在贵州省遵义县ZK1井施工中的应用研究[J].地质与勘探,2016,52(1):165-172.
- [7] 赵华宣,王玉军,陈涛,等.贵州碎屑岩层地热深井空气潜孔锤钻进技术应用研究[J].地质与勘探,2016,52(5):942-949.
- [8] 董润平,胡忠义.RD20 II型钻机及空气潜孔锤钻进施工中若干问题探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(12):50-53.
- [9] 赵岩,仲玉芳.贵州雷山县CK1地热勘探井施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(10):32-35,40.
- [10] 赵华宣,李强,陈涛,等.贵州碳酸岩层地热深井空气潜孔锤钻进技术应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(2):37-42.
- [11] 郝文奎,宋宏兵,康亢,等.多工艺空气钻进技术在深水井施工中的应用实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(12):11-14.
- [12] 朱江,王萍,蔡利山,等.空气钻井技术及其应用[J].钻采工艺,2007,30(2):145-148.
- [13] 陈怡.空气潜孔锤钻进技术在援豫抗旱找水成井施工中的应用[J].贵州地质,2012,29(2):128-131.
- [14] 杨富春.空气潜孔锤在水源钻井中的应用[J].中国煤炭地质,2009,21(6):71-73.
- [15] 刘海波.空气泡沫潜孔锤钻进技术在大直径基岩深井中的应用试验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(5):31-34.
- [16] 王虎,陈怡,段德培,等.贵州省深部地热钻井现状与发展建议[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(2):45-47,52.