

张福山矿区复杂地质条件岩心钻探 关键技术研究

潘德元, 万大剑*, 吕敬尊, 徐秋文

(中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南长沙 410000)

摘要:针对张福山矿区上部地层塌陷、地表变形及地下水疏干等复杂地质条件导致地质岩心钻探中面临的孔壁失稳、冲洗液随钻随漏等关键技术难点,通过优化孔身结构并配合跟管钻进工艺克服了孔壁失稳的难题,同时创新采用了定压单向阀以保持冲洗液的动态压力,实现安全钻进,有效解决了上部复杂地层的施工难点。下部地层采用满眼绳索取心钻具组合,实现了钻孔轨迹良好控制,顺利钻遇矿层。工程实践表明,该方法可为类似地质条件的地质岩心钻探提供技术参考,支撑新一轮找矿突破战略行动。

关键词:孔壁失稳;随钻随漏;复杂地质条件;定压单向阀;满眼绳索取心钻具;张福山矿区

中图分类号:P634 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0277-06

Research on key technologies for core drilling in complex geological conditions at Zhangfushan Mining Area

PAN Deyuan, WAN Dajian*, LÜ Jingzun, XU Qiuwen

(Changsha Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Changsha Hunan 410000, China)

Abstract: In response to the key technical challenges in the Zhangfushan Mining Area upper stratum, such as borehole wall instability and simultaneous drilling fluid leakage during drilling, which caused by complex geological conditions including stratum collapse, surface deformation, and groundwater drainage, the issue of borehole wall instability was overcome by optimizing the hole structure and combining it with the casing drilling process. Additionally, an innovative pressure-controlled check valve was introduced to regulate the dynamic pressure of drilling fluid, ensuring safe penetration through the upper complex formations. In the lower stable strata, a packed-hole wireline coring assembly was employed to achieve precise borehole trajectory control, ultimately successfully penetrating the target ore zones. Engineering practices demonstrate that this integrated approach provides technical references for core drilling in similar geological settings and supports the new round of strategic mineral exploration breakthrough initiatives.

Key words: borehole wall instability; dynamic drilling fluid loss during drilling; complex geological conditions; pressure-controlled check valve; packed-hole wireline coring assembly; Zhangfushan Mining Area

0 引言

金山店铁矿张福山矿区是湖北省大冶市重要的铁矿资源基地,其中Ⅰ、Ⅱ号矿体为矿区最大的

两个矿体,相距15~200 m,相互平行,呈叠瓦状排列,Ⅰ号矿体赋存标高为+16~-1000 m,厚度为

收稿日期:2025-05-12;修回日期:2025-06-12 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.043

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“东部地区战略性矿产靶区查证技术支撑(长沙中心)”(编号:DD020240207304)

第一作者:潘德元,男,汉族,1982年生,高级工程师,探矿工程专业,硕士,从事钻探工艺研究工作,湖南省长沙市宁乡市城郊街道学府路258号,99676335@qq.com。

通信作者:万大剑,男,汉族,1986年生,技术员,探矿工程专业,长期从事钻探工程相关工作,湖南省长沙市宁乡市城郊街道学府路258号,991526352@qq.com。

引用格式:潘德元,万大剑,吕敬尊,等.张福山矿区复杂地质条件岩心钻探关键技术研究[J].钻探工程,2025,52(S1):277-282.

PAN Deyuan, WAN Dajian, LÜ Jingzun, et al. Research on key technologies for core drilling in complex geological conditions at Zhangfushan Mining Area[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 277-282.

20~80 m, II号矿体赋存标高为+70~-719 m,厚度为10~150 m^[1-2]。为了对张福山矿床I、II号矿体深部特征进行查证,探查铁矿体的延长与延深情况,开拓金山店岩体南部找矿空间,支撑新一轮找矿突破战略行动,部署了岩心钻探工作。

张福山矿区由于长期采矿引起上部地层塌陷变形,又经回填治理等作业,该区域上部地层很不稳定,钻探过程中孔壁稳定性极差,同时由于采矿过程中的地下水疏干,矿区地下水位下降严重。经现场调研,该矿区地下水位在500 m以深,矿区周围施工的岩心钻孔事故频发,多次发生断钻具事故,台月效率低。本次钻探任务位于地表变形的核心区,通过优化孔身结构穿过上部复杂地层、采用新工艺克服随钻随漏的特殊工况、优化孔底钻具组合提高钻孔轨迹质量等措施,高效完成了钻探任务,可为类似地质条件的岩心钻探提供技术参考。

1 工程概况

1.1 地层概况

张福山矿床位于金山店侵入杂岩体的南缘中段,处于新华夏系第二隆起带的次级构造鄂城-大磨山主体复合隆起带部位大冶复向斜北翼^[1-3]。主要由三叠系地层组成,上覆第四系坡积、残积物为主。三叠系地层岩性主要为石英砂岩、砂质页岩、细砂岩、粉砂岩等。三叠系中上统蒲圻群为一套砂页岩组合地层,位于矿体上盘,是矿体的主要顶板围岩构成,厚度615~922 m,由于受岩浆侵入时的接触热力变质作用和交代变质作用,砂页岩变质为各种角岩,灰岩变质为大理岩、矽卡岩。中统灰岩岩组以白云质灰岩、灰质白云岩为主,是本矿床主要控矿层位。金山店岩体南缘地层向SSW陡倾,倾角44°~74°,在靠近张福山铁矿区部位倾角高达85°^[2-4]。

1.2 地层变形概况

张福山矿床从建设到投产至今已经40年左右,主要采用竖井开拓,无底柱分段崩落法进行采矿,矿区已发生多处多次的地表变形甚至塌陷(见图1),进而又引起周边地表变形开裂等地质灾害^[3-5]。在1981—1982年间,在I、II号采区监测的最大水平位移为703 mm,最大下沉量为1853 mm,2000年左右出现了大小不一的塌陷坑和地裂缝群,2014—2016年回填治理后的采区再次出现塌坑,周围多次

拉剪错断裂缝^[5]。该矿区于2015年开始回填塌陷区的治理工作,实践表明地表回填对区域变形有抑制作用,但目前认为张福山矿区东区回填量仍处于较低水平^[2]。



图1 矿区地表塌陷^[2]

1.3 钻孔部署

为了开拓金山店岩体深部的找矿空间,根据白云铁矿200号勘探线和已有钻孔揭示的I、II号浅部的矿体形态,这两个矿体向南深部延伸,近似平行,结合已有地质资料和地球物理工作研究,极有可能在白云铁矿200号勘探线-500~-800 m段钻遇隐伏矿体。因此,部署ZK2001钻孔,设计深度900 m,开孔倾角75°(顶角15°),倾向20°。该钻孔设计位置与矿体推测见图2,终孔口径不小于N级,钻孔质量按《地质岩心钻探规程》(DZ/T 0227—2010)执行。

2 施工难点

2.1 复杂的地层应力

地层的应力状态是钻探过程中孔壁稳定性的重要影响因素之一。王柏辉等^[6]研究了力学与流场、温度场、压力场等多场耦合下井壁失稳影响机制,提出了通过优化钻井参数和冲洗液性能以提高井壁稳定性的建议;张明明等^[7]针对破碎地层的裂隙特征,研究裂隙和轨迹对井壁稳定的影响,提出了通过调整井眼轴向与裂缝面相对夹角以控制井壁失稳程度的建议;林永学等^[8]认为破碎地层的应力集中和胶结程度差是井眼失稳的主要原因,通过提高冲洗液的密度和封堵性能可较好地保持井壁稳定;朱金勇^[9]、宋厚园^[10]均通过对岩石的各种应力试验,采用高质量冲洗液有效提高井壁稳定性。

由于该矿区经过多年的矿产开采,矿区已发生塌陷,进而引起地面变形,后期又开展回填治理工作,上部地层处于不稳定状态,应力状态十分复杂。

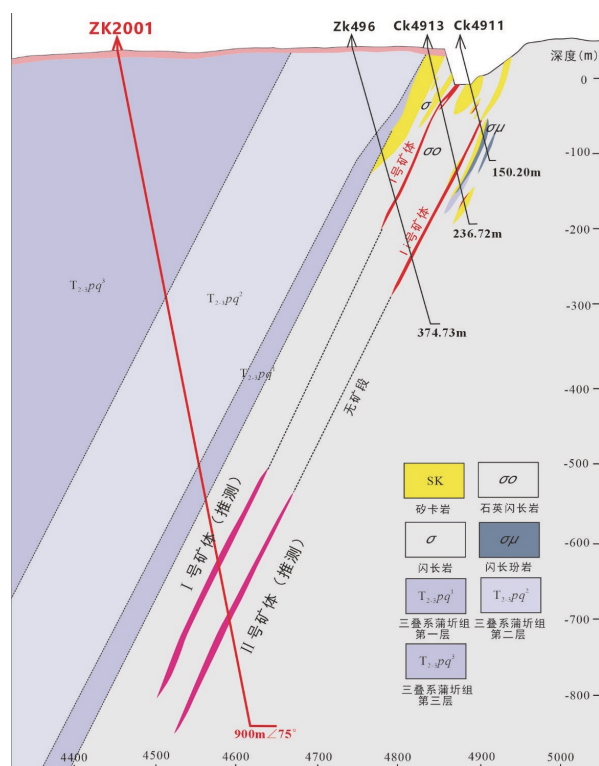


图2 ZK2001 钻孔设计位置与矿体推测

而上述研究都是以地层处于应力平衡状态的前提下针对孔壁受到钻探过程中各种因素干扰开展的稳定性分析^[6-10],可以推断出失稳状态的地层钻进时孔壁的稳定性更差,同时ZK2001钻孔设计为斜孔,进一步加剧了孔壁的不稳定性。图3为矿区采取的岩心,可见受采矿塌陷的影响,岩心应力释放而出现破碎,如何维护孔壁稳定是本钻孔的重点和难点。



图3 破碎的岩心

2.2 严重漏失

地质钻探中常见的冲洗液失返性漏失,是由于地层压力较低,受液柱压力影响,冲洗液在上返过程中漏失至地层,未能上返至孔口,但井筒内依然存在一段液柱,能够起到冷却钻头、携带岩粉的作用。因此进行短期的顶漏钻进也可保证钻头的安全。

但是受采矿的影响,该矿区内地下水疏干严重,钻进过程中冲洗液流出钻头后即从孔底全部漏失进地层中,即使采用各种堵漏工艺对上部地层进行堵漏,钻开新地层后即再次发生漏失,使得井筒环空内无液柱,无法建立孔内循环,难以发挥冲洗液冷却钻头和润滑钻具的作用,使得钻头寿命大幅度降低^[11],也导致裸眼段钻具磨损加快。图4为该矿区漏失段施工的钻头磨损情况。



图4 漏失段的钻头磨损情况

同时,前文所述,提高孔壁稳定性最重要的技术措施便是合理的应用冲洗液体系,然而根据本矿区的漏失情况,几乎无法采用冲洗液稳定孔壁。因此,如何穿越上部应力不稳定、严重漏失段地层是ZK2001钻孔的重点和难点。

2.3 高陡地层对钻孔轨迹影响

该矿区深部地层倾角44~74°,靠近张福山铁矿区倾角高达85°^[2-4],地层倾角大,钻孔易斜,轨迹控制难度大^[12-13],需要制定针对高陡地层的钻孔轨迹控制措施,确保能够精准地钻遇矿层靶区,支撑深部矿产资源调查。

3 钻探关键技术

由于矿区的钻孔施工资料较少,ZK2001钻孔在部署过程中未充分认识到相关的复杂情况,首次按照常规的地质条件选用钻探设备并设计钻孔结构,

遇到了多种复杂情况,在钻至280 m时,由于孔内情况复杂和孔身结构限制,难以继续施工,钻孔报废。第二次在原孔位附近重新开孔,针对该矿区的地质复杂情况,制定了相应的技术措施,同时得益于第一次钻孔的堵漏措施,上部地层漏失情况明显好转,钻至900.2 m顺利终孔,到达了目标矿层,实现了矿产勘查目的。

3.1 优化孔身结构

第一次钻孔设计三级口径和二级套管的孔身结构,选用P级或 $\varnothing 110$ mm 钻具开孔,二开用H级绳索取心钻具穿越破碎层,三开换N级绳索取心钻具施工至终孔。实际施工时采用 $\varnothing 122$ mm 口径取心钻具开孔,钻至34 m遇到较完整地层,下入 $\varnothing 114$ mm 套管,换 $\varnothing 98$ mm 绳索取心钻具钻进至80 m,换 $\varnothing 76$ mm 绳索取心钻具拟钻进至终孔。然而在 $\varnothing 76$ mm 口径钻孔施工中钻遇多层前文所述的不稳定地层,现场采用 $\varnothing 98$ mm 钻具扩孔跟管的工艺钻进至180 m,并对不稳定地层进行护壁,由于地层不稳定,套管受到的地层阻力较大,继续跟管难度增大。后续再次钻遇多个不稳定地层,由于下部地层存在较大的不确定性,当前孔径已是设计要求的最小口径,考虑到再次扩孔跟管和处理复杂情况的效率极低,遂终止施工。第一次钻孔孔身结构见图5(a)。

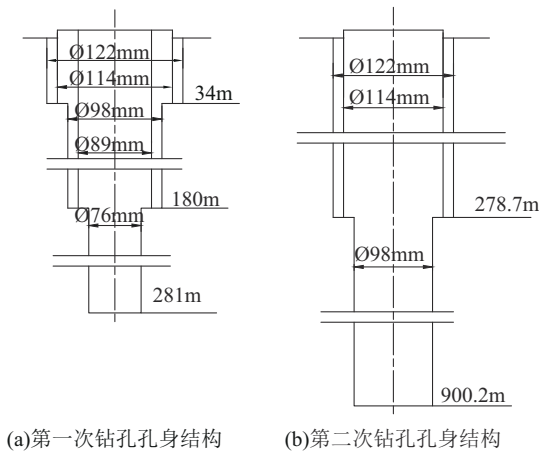


图5 ZK2001 钻孔实际孔身结构

第二次孔身结构设计时充分吸取了上次的经验,将钻孔口径扩大一级,为处理复杂情况留有余地。现场配备了 $\varnothing 150$ mm 取心钻具,但该钻具为单管取心钻具,如采用该级口径直接开孔,钻进效率较低,且频繁的起下钻取心作业易加剧孔壁的不稳

定性。故先采用 $\varnothing 122$ mm 口径开孔,拟在钻遇复杂情况后采用 $\varnothing 150$ mm 钻具进行扩孔。同时采用 $\varnothing 98$ mm 作为终孔口径,预留了 $\varnothing 76$ mm 一级口径,防止下部地层再次出现复杂情况。

由于第一次钻孔施工时采取了多种护壁堵漏工艺,对钻孔周围的地层起到了较好的稳定作用,第二次施工时孔内的复杂情况得到较大改善,未采用 $\varnothing 150$ mm 钻具扩孔,直接用 $\varnothing 122$ mm 口径钻至278.7 m,然后采用 $\varnothing 98$ mm 口径终孔,见图5(b)。

3.2 优选钻探设备

第一次钻孔施工时,采用了CSD1300G 型全液压钻机,理论上可满足该钻孔的设计要求。但由于地层不稳定,加大了各种工况的负荷,且在优化孔身结构设计后,需采用 $\varnothing 98$ mm 口径钻至900 m 终孔,其施工能力已难以满足要求。为提高钻孔施工能力和复杂情况处理能力,更换为CSD1800X 型全液压钻机,相关性能参数见表1。

表1 全液压钻机主要性能参数

参 数	CSD1300G 钻机	CSD1800X 钻机
钻深能力/m	B 级	1300
	N 级	1000
	H 级	700
	P 级	400
最大扭矩/(N·m)	4257	5500
动力头提升力/kN	120	189
给进力/kN	50	50
主卷扬提升力/kN	68	135

3.3 长段疏干地层的节水钻进工艺

矿区上部存在长段的疏干地层,地表已无可利用的水源,生产用水依靠自来水供给,水量较小。钻进过程中冲洗液几乎从孔底全部漏失,且在重力作用下,漏失速度甚至大于泵入速度,造成孔口无返浆、泥浆泵无泵压、管柱内冲洗液不连续等状况,使得钻头工作情况难以判断,同时也导致现场供水紧张。

在ZK2001 钻孔第一次施工时,在 $\varnothing 98$ mm 和 $\varnothing 76$ mm 孔段钻遇多段该种地层,产生了上述状况,现场通过改装取心内管的到位报信机构,安装冲洗液定压开启阀(见图6)。该阀可通过改变弹簧强度调整开启压力,本次施工将开启压力设计为4 MPa。当泵压加上液柱压力达到4 MPa 后,阀门开启,冲

洗液流通,提高了钻头的冷却效果。同时,在管柱内充满冲洗液后,可降低泥浆泵排量,从而减少冲洗液的漏失速度,减少水资源浪费^[11]。



图6 定压开启阀装置

在安装定压开启装置前,为确保冲洗液对钻头的冷却效果,现场采用的泵量为100~120 L/min左右,泵压表显示为0,每钻进2~3 h左右需停钻蓄水,钻头磨损严重(参见图4),使用寿命也较短。采用该装置后,泥浆泵排量为40~50 L/min,泵压为2~3 MPa,大大降低了耗水量,保证了钻探施工的连续性。

3.4 孔壁稳定及堵漏措施

针对ZK2001钻孔上部地层不稳定、无冲洗液护壁,加上斜孔等因素,造成孔壁稳定差、漏失严重,现场采用了多种技术措施联合处理。

在堵漏工艺方面,由于该钻孔孔底漏失速度快,为防止堵漏材料尚未发挥堵漏效果就已漏失,对于小型裂隙采用多次小泵量注入水泥浆的方式,逐步提高钻孔周围的水泥浆封固效果。而钻遇垮塌层及较大裂隙段时,从孔口投入水泥球、黏土球的措施对于斜孔并不理想,故先采用颗粒型材料架桥填充后再用水泥浆封堵,包括膨胀性吸水树脂、膨胀橡胶、锯末、海带、黄豆、棉絮等,见图7。

在钻探工艺方面,采用跟管钻进技术穿越不稳定地层^[12-13]。当钻遇不稳定地层时,提出孔内钻具,采用上一级的套管扩孔钻进至孔底,对孔壁形成支撑后继续采用原钻具钻进,如此循环,直至穿越不稳定地层。

3.5 钻孔轨迹控制措施

绳索取心钻具的工艺要求和结构特点限制了多种防斜钻具的应用^[14],同时受限于钻探成本和钻进效率,多采用满眼绳索取心钻具作为常规的防斜



图7 堵堵材料及效果

工艺,潘德元等^[15]针对满眼绳索取心管柱的扶正器安装和跨距设计提出了建议。

ZK2001钻孔深部地层倾角高陡,钻孔轨迹控制难度大,根据《地质岩心钻探规程》(DZ/T 0227-2010)中的钻孔弯曲要求(顶角偏斜不大于3°/100 m),计算可知孔底轨迹将偏移设计靶区超百米^[16],不利于查证矿层的延深情况。为提高矿产勘查的精度,需要提高钻孔孔身质量。因此本钻孔在穿越上部复杂地层后,采用了满眼绳索取心钻具结构,为确保管柱的防斜效果,同时合理地部署了扶正器的数量和安装位置,使得管柱保持较低的摩阻。根据现场采用的钻杆长度,在取心钻具上一根钻杆处加装一个扶正器,跨距为3 m,与上下扩孔器形成满眼钻具组合。ZK2001钻孔钻至终孔孔深900.2 m时倾角68.8°,全孔孔斜平均变化率为0.69°/100 m,钻孔轨迹质量较好。

4 施工总结

受多年的采矿影响,ZK2001钻孔上部长段地层应力不稳定、地下水疏干是施工的重点和难点问题。针对地下水疏干情况,通过技术创新,应用了

定压开启阀,降低了施工过程中的漏失,较好地解决了冲洗液快速漏失影响钻头冷却的问题;采用多种堵漏措施联合跟管钻进工艺,穿越了上部不稳定地层。在总结了第一次钻孔的经验教训后,第二次更换了大功率全液压岩心钻机,优化了钻孔结构,加之第一次的多种堵漏措施经过较长时间的凝固,钻孔周围的地层强度和堵漏效果进一步加强,使得第二次施工时上部地层处于较稳定状态,未发生较大漏失和孔壁失稳,施工顺利。在穿越上部地层后,采用了满眼绳索取心钻具,提高了防斜效果,较好地控制了钻孔轨迹,确保了控制矿体延深的精确度。

5 结论及建议

通过ZK2001钻孔的施工,对于该种经过多年开采引起上部地层失稳及地下水疏干的矿区,提出了一套可靠、实用性强的技术措施,具有一定的参考价值,可为类似复杂地层提供参考。

(1)在经过多年开采的矿区施工,应充分收集相应的工程地质资料,如资料匮乏,为应对未知的复杂情况,在钻探设备选择和孔身结构设计上应留有余地。

(2)在长段的地下水疏干地层,本孔采用的定压开启阀可较好地解决冲洗液快速漏失影响钻头冷却的问题,同时实现节水钻进,具有一定实用效果。

(3)对于应力不稳定地层,在留有足够的孔径储备同时,可采用多种堵漏工艺联合跟管钻进工艺穿越复杂地层。

(4)采用水泥浆的堵漏效果在其龄期内随着时间增加而增强,施工现场应考虑该因素对孔壁稳定性的影响。

(5)针对高陡易斜地层,可采用满眼取心钻具,具有较好的防斜效果。

参考文献:

- [1] 李傲竹,阮业东,程普,等.鄂东南张福山-柯家山地区铁矿地质特征及找矿方向探讨[J].资源环境与工程,2022,36(3):321-328.
- [2] 樊海云,邵勇,陈从新.张福山矿区东区塌陷区回填对地表变形的影响研究[J].矿业研究与开发,2024,44(8):148-156.
- [3] 陈从新.复杂条件下地下采矿稳定性研究[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2004.
- [4] 庞厚利.金山店铁西矿区地下开采引起的地表和岩层移动机理研究[D].淮南:安徽理工大学,2019.
- [5] 宋卫东,王欣,杜建华.程潮铁矿无底柱分段崩落法开采诱发地表变形规律[J].金属矿山,2012(7):9-12,18.
- [6] 王柏辉,赵龙飞,尹武兵,等.深部含层理弱面储层井壁失稳力学研究进展[J].钻探工程,2025,52(1):4-15.
- [7] 张明明,李大奇,范翔宇.破碎地层井壁坍塌压力及井周失稳区域研究[J].断块油气田,2024,31(5):916-921.
- [8] 林永学,王伟吉,金军斌.顺北油气田鹰1井超深井段钻井液关键技术[J].石油钻探技术,2019,47(3):113-120.
- [9] 朱金勇.汶川地震断裂带科学钻探孔壁稳定时效特性研究[D].成都:成都理工大学,2017.
- [10] 宋厚园.缓角度绳索取芯钻孔井壁稳定性分析及钻井液研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [11] 蔡隽,王步清,王虎,等.南方丘陵地区岩心钻探关键技术措施[J].钻探工程,2025,52(2):28-37.
- [12] 龙海涛,杨福全,伍承浩,等.云南某铅锌矿区复杂地层钻探施工技术应用研究[J].云南冶金,2024,53(1):32-36,41.
- [13] 张旭,李中明,王泽,等.东北寨金矿复杂地层综合钻探施工技术[J].钻探工程,2024,51(S1):292-298.
- [14] 潘德元,熊亮,王杰,等.地质岩心钻孔轨迹控制技术研究进展[J/OL].地质科技通报.https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240373.
- [15] 潘德元,贺前平,蔡隽,等.绳索取心满眼管柱的力学模型优化与应用[J].力学与实践,2023,45(3):585-591.
- [16] 潘德元,贺前平,蔡隽,等.雪峰弧构造带钻孔轨迹控制关键技术研究[J].钻探工程,2024,51(5):108-114.

(编辑 王跃伟)