

空气潜孔锤跟管钻进技术在矿山溜井疏通工程中的设计与应用

黄晓林, 王汉昌*, 江欣, 姜昭群

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要:空气潜孔锤跟管钻进技术在复杂地层钻进中具有显著优势。针对溜井频繁堵塞严重影响矿山安全生产的问题,以都江堰某水泥用石灰岩矿山1号溜井内的矿料恶性堵塞为研究对象,基于空气潜孔锤快速钻进特点,结合溜井堵塞疏通爆破孔的需求,提出远距离斜孔、近端垂直孔、近端斜孔等多类型、多维度的疏通爆破钻孔实施方案。应用结果表明:近端斜孔采用具有定向保直特性的空气潜孔锤同心跟管钻进技术能高效穿入堵塞段,高精度爆破井快速有效疏通溜井内堵塞矿料;采用潜孔锤跟管钻进技术,ZK5疏通爆破孔0~68 m孔段平均钻速8 m/h,68~143 m孔段平均钻速高达15 m/h,钻进效率相较于常规钻进技术提高显著;空气潜孔锤裸孔钻进工艺成孔速度快,但孔底锤头的摆动容易产生较大的孔斜变化,特别是在斜孔中受重力和钻压的影响下钻孔轨迹更易偏离,在后续研究中建议增加孔内数据分析采集系统,实现地下-地面实时响应和轨迹控制。本文利用空气潜孔锤同心跟管钻进工艺,实现溜井高效、精准疏通,为矿山溜井堵塞事故处理提供了有力的技术支持。

关键词:溜井堵塞;爆破孔;空气潜孔锤;同心跟管钻进;定向保直

中图分类号:P634.5;TD87 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2026)S1-0360-08

Design and field application of air DTH hammer casing-following drilling for dredging of mine orepasses

HUANG Xiaolin, WANG Hanchang*, JIANG Xin, JIANG Zhaoqun

(Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: The air DTH hammer casing-following drilling technology presents prominent advantages in complex formations drilling. Aiming at the frequent blockage of orepasses that seriously endangers mine safety production, this study takes the severe ore blockage occurring in No.1 orepass of a limestone mine for cement production in Dujiangyan as the research object, combined with the requirements for drilling blasting holes to clear orepass blockages, multiple types multi-dimensional drilling schemes for blasting holes are proposed, including long-distance inclined holes, near-end vertical holes and near-end inclined holes based on the rapid drilling technology of air DTH hammers. Field application results show that the near-end inclined holes were successfully drilled through the blockage sections using concentric DTH hammer casing-following with directional and straight-hole maintaining performance, and the rapid construction of high-precision blasting holes realized effective orepass clearing. For the ZK5 blasting hole, the average drilling rate reached 8 m/h at the interval of 0~68 m and 15 m/h at 68~143 m. The overall drilling efficiency was greatly improved compared with conventional drilling methods. Although open-hole drilling with air DTH hammer

收稿日期:2026-06-10; 修回日期:2026-07-04 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.S1.048

基金项目:国家科技重大专项课题(编号:2024ZD1003101);中国地质调查局地质调查项目“地质矿产勘查技术方法升级与应用(中国地质科学院探矿工艺研究所)”(编号:DD20240205506)

第一作者:黄晓林,男,汉族,1987年生,高级工程师,机械工程专业,硕士,主要从事钻探技术研究和开发工作,四川省成都市郫都区港华路139号,515661320@qq.com。

通信作者:王汉昌,男,汉族,1998年生,助理工程师,石油与天然气工程专业,硕士,主要从事深孔复杂地层钻探技术研究工作,四川省成都市郫都区港华路139号,2315182634@qq.com。

引用格式:黄晓林,王汉昌,江欣,等.空气潜孔锤跟管钻进技术在矿山溜井疏通工程中的设计与应用[J].钻探工程,2026,53(S1):360-367.
HUANG Xiaolin, WANG Hanchang, JIANG Xin, et al. Design and field application of air DTH hammer casing-following drilling for dredging of mine orepasses[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1):360-367.

achieves fast hole-making, however, swing of the bottom hammer tends to induce significant hole deviation. Drilling trajectories are especially prone to deflection in inclined holes under the effect of gravity and weight-on-bit. Accordingly, an in-hole data acquisition and analysis system is recommended in follow-up research to realize real-time downhole-surface interaction and borehole trajectory control. This study verifies that the concentric air DTH hammer casing-following drilling technology can achieve efficient and precise orepass clearing, providing a solid technical reference for the treatment of orepass blockage in mines.

Key words: orepass blockage; blasting hole; air DTH hammer; concentric casing-following drilling; directional straightening

0 引言

溜井是矿山矿石转运的核心通道,采用安全合理的开采与运输方式可有效降低生产安全事故。例如,在丘陵地貌等地形复杂区域,采用“溜井-平硐开拓”运输方式的露天矿区,利用地形高差和矿石自重放矿,缩短运输距离,减少运输设备数量,还具有一定的贮矿能力,可进行生产调节^[1-3]。然而,溜井的稳定性直接影响矿山岩石的生产能力,其堵塞问题已成为矿山安全生产面临的常见挑战。

矿山溜井堵塞主要与矿山地质条件、矿井支护强度和所受冲击载荷等因素密切相关。在溜井建设和爆破降段时期,溜井钻进进尺和爆破降段频率对井壁支护结构有很大影响,结构脱落与井壁围岩垮塌造成溜井堵塞。此外,在担负矿石贮存和运输任务时,破碎矿屑对井壁的冲击和爆破破岩对井壁的震荡导致溜井井壁产生变形破坏,进一步增大堵塞风险^[4-7]。针对易发生溜井堵塞的矿山,制定快速疏通预案,是提高安全生产效率的关键。

传统的溜井疏通方法主要包括人工清理、机械挖掘和爆破疏通等。其中,人工清理效率低且安全性差;机械挖掘受限于设备尺寸和复杂地层条件;爆破疏通则可能对井壁结构造成二次破坏,甚至引发新的堵塞^[8-9]。考虑传统方法在排渣和井壁稳定性控制方面也存在明显不足,难以满足现代矿山高效、安全的生产需求,采用空气潜孔锤跟管钻进技术十分必要。

随着技术革新的不断深入,空气潜孔锤跟管钻进技术逐渐成熟,为解决溜井堵塞问题提供了新的思路。该技术结合了冲击破岩和回转破岩的特点,通过高频冲击和旋转切削双重作用,显著提高了钻进效率,尤其适用于硬岩和复杂地层。同时,随钻跟管在井壁与钻杆之间形成新的循环通道,很好地解决了排渣难题,减少了井壁坍塌的风险^[10-12]。近年来,国内在空气潜孔锤跟管钻进技术的应用方面

取得了显著进展。赵建勤等^[13]阐述了该技术在地质灾害防治、水电站围堰、城市建筑深基坑处理等领域的应用效果,突破了松散堆积体和卵石层的造孔瓶颈,显著提高了钻进效率,为安放预应力锚索技术的实施创造了良好条件。王立峰等^[14]优化了大直径空气潜孔锤跟管钻进技术,采用常规风量即可保证破碎岩屑快速排出井口,提高了岩屑上返效率,大大降低施工成本,为王台铺矿凤凰山矿正常生产提供保障。迟焕鹏等^[15]针对黔西地区碳酸盐岩地层易漏易垮问题,建立了包含空气潜孔锤跟管钻进在内的钻井工艺技术体系,将套管留于井内稳定井壁,同步实现复杂地层钻进与地层封隔。赵江鹏等^[16]和张彪等^[17]研究表明,空气潜孔锤能够很好解决牙轮钻头硬岩钻压大、漏失地层钻进难等问题,快速、精准、安全地钻进目标,有效开展矿山救援工作。

当前国内外尚无针对溜井恶性堵塞的有效疏通方案,缺少采用空气潜孔锤同心跟管定向钻进构建精准爆破孔的成套工艺研究,无法为同类矿山溜井应急疏通提供标准化技术路径。因此,本文结合都江堰某水泥用石灰岩矿1号溜井的实际情况,提出远距离斜孔、近端垂直孔、近端斜孔三类差异化爆破钻孔疏通实施方案,配套多规格同心跟管钻具组合,分析不同钻孔布置及钻具组合的控斜效果与钻进效率,形成适用于深溜井堵塞治理的高效精准疏通工艺,为同类矿山溜井堵井应急处置提供技术参考。

1 工程概况

某石灰岩矿1号溜井位于扬子准地台龙门山-大巴山台缘拗陷之龙门山陷褶断束,海拔标高1060~1606.9 m,相对高差546.9 m。区内构造复杂,断层、褶皱发育,断层贯穿1号溜井,断层面产状 $300^{\circ}\sim 350^{\circ}\angle 50^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 。矿床石灰岩呈层状单斜产出,断层分支、挤压破碎带明显。部分崩塌的岩石揭露有断层滑移面,滑移面走向向坡下发展,地层

变化较复杂,靶向钻孔难度加大。区内西段石灰岩矿山自上而下分台阶露天开采、中深孔逐孔微差爆破、液压破碎锤二次破碎和机械铲装运输^[18-19],初步破碎后的原料矿石采用“竖井—平硐—皮带”输送系统,通过两条长6 km皮带系统输送到工厂预处理地点,同时供应工厂三条水泥窑生产。

1号溜井为垂直溜井,建造直径为6 m,垂深170 m,深度较深,放矿冲击力大,井壁冲击磨损大,井壁维护困难。1号溜井于2023年11月进行了高精度的三维激光扫描,结果显示溜井整体基本完整,如图1所示,1号溜井井口呈倒立喇叭口状,在矿料的冲刷下井口最大直径达到了 $\varnothing 25$ m,井身段在10~27和38~80 m有小范围的破坏。井身段最大破坏位置出现在77 m处,按等面积直径计算,破坏尺寸(增大尺寸)为1.87 m,按直接破坏尺寸计算,最大尺寸为8.56 m。

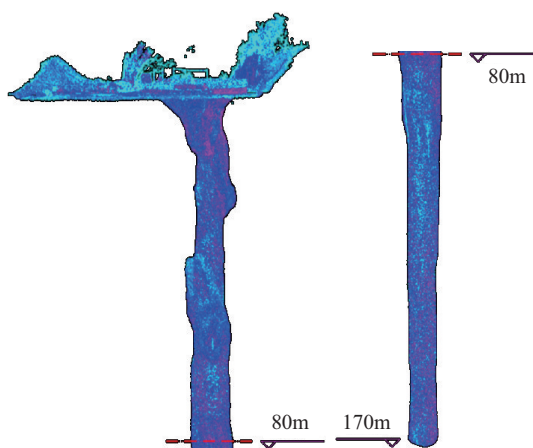
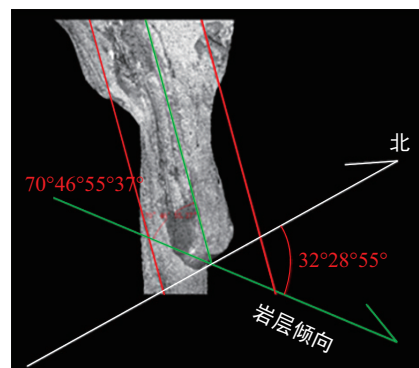


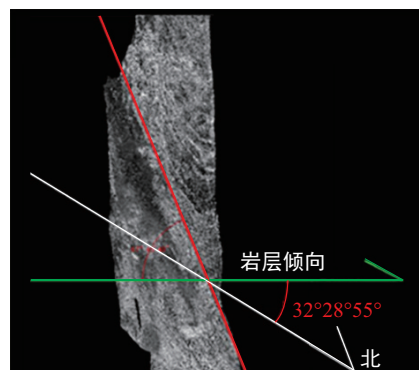
图1 溜井三维激光扫描点云数据

三维激光扫描^[20]结果显示1号溜井内部能清晰呈现出两种倾斜构造如图2所示,从图中可以看出构造的产状倾角分别是 67° 和 70° ,这种产状在矿料的长期冲刷下导致井壁脱落,若有大块井壁脱落,容易进一步导致溜井堵塞。同时由于地层产状的存在对紧急疏通钻孔的轨迹控制难度较大,增加了成功精准钻至预设爆破点的难度。

根据1号溜井下方平硐二次破碎出料方量情况和硐室视频监控情况,预判井中大约有140 m深的石灰石原料,判断1号溜井在140 m左右可能有一个堵塞点,同时也不排除140 m上方存在多个堵塞点的可能。



(a)上部构造



(b)下部构造

图2 1号溜井三维激光扫描内部构造

2 溜井段疏通施工方案

2.1 孔位布置原则

孔位的布置应首先考虑钻孔施工的安全性。理论上,较为简单有效的爆破孔布置方案是在溜井正上方,垂直向下钻孔,穿越井中破碎松散矿料,直达预判的最深堵塞点,然后预埋炸药进行爆破。但为确保施工安全,钻孔设备必须设置在稳固的地基上,并确保设备周围有足够的的操作空间。即使通过架设钻孔平台解决设备站位问题,钻进过程中仍可能对井内破碎矿料产生扰动,或遇到卡堵点,进而引发井内矿料坍塌并急速下坠,造成安全事故,危及人员与设备安全。

孔位应尽量靠近溜井的假想中心。钻孔距离假想中心越短,越容易精确进入料仓。在不开挖井口松散岩层的情况下,可以选择井口边缘较为坚固的基岩点作为孔位,并设置倾斜孔直达堵塞点。若开挖井口松散岩层并降低标高以缩小井口直径,则可设置小倾角斜孔,减少孔斜精度要求,从而降低进入井中料仓的难度。当孔位与溜井壁的距离足够短时,可考虑设置垂直孔,确保爆破能量有效穿透井壁并到达堵塞点。

孔位设置还需充分考虑地层产状的影响。地层产状可能导致钻孔沿层位偏移,特别是倾斜孔的设置,其方位应尽量与地层产状走向垂直,以最大限度地减少地层产状对孔斜的影响。

2.2 远距离斜孔钻进方案

2.2.1 确定孔位

1号溜井紧急疏通任务采用多种钻孔方案并行,以期最短时间内成功通井。在不开挖井口的情况下,按照图3所示的溜井4—4'井径线方向,选择了一处坚固基岩(位于矿料车辆运输倒料处)作为钻孔位置,并设置斜孔ZK1。经比较测量并确保足够的安全施工半径后,ZK1孔位距1号溜井假想中心的最短距离为17 m,这一距离为不开挖井面情况下能够设置合适孔位的最小值。由于地貌条件的限制,ZK1孔位未专门考虑地层产状的影响。

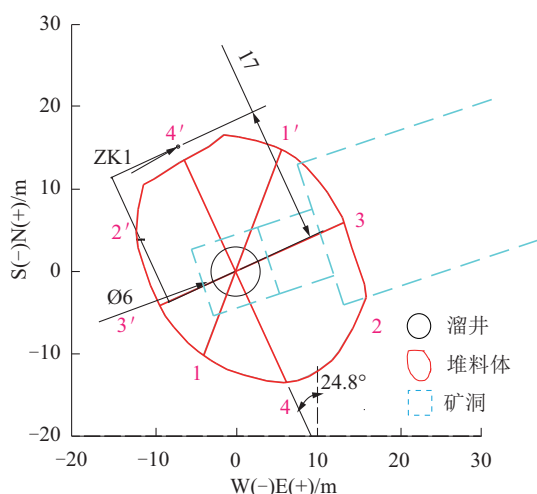


图3 ZK1斜孔孔位示意

2.2.2 钻孔结构和钻具组合

斜孔ZK1布置于4—4'井径线(方位角 155°)处,钻孔地层较为完整,岩性以石灰岩为主。但存在少数裂隙和部分松散夹层(厚度 $<3\text{ m}$)。因此,斜孔ZK1在未进入溜井前的较完整岩层中采用 $\varnothing 192\text{ mm}$ 空气潜孔锤裸孔钻进,进入井中料仓后采用 $\varnothing 168\text{ mm}$ 空气潜孔锤同心跟管钻进工艺,钻至井中预判堵塞点。

图4所示为设计的ZK1斜孔,斜孔轴线与水平面夹角 81.4° (钻孔顶角 8.6°),方位角 155° ,钻孔结构采用二开结构。一开口径为 $\varnothing 192\text{ mm}$,采用 $\varnothing 192\text{ mm}$ 空气潜孔锤裸孔钻进,该孔段钻进长度 98.7 m (对应溜井深度为 97.6 m),钻孔完全进入溜井内;

二开口径为 $\varnothing 168\text{ mm}$,一开完成后起钻,在 $\varnothing 192\text{ mm}$ 裸孔段内下入 $\varnothing 168\text{ mm}$ 同心跟管钻具,即 $\varnothing 168\text{ mm}$ 空气潜孔锤同心跟管钻具,在溜井内破碎矿料中进行跟管成孔护壁钻进,钻进长度 42.9 m (对应溜井深度 140 m)。该钻孔结构若能精确实现, $98.7\sim 141.6\text{ m}$ 钻孔段处于溜井内,对应的溜井深度为 $97.6\sim 140\text{ m}$,全覆盖了所有预判堵塞点位,在孔内下端预埋 40 m 长的炸药可一次性破碎所有堵塞矿料。在实施过程中,孔的顶角偏差不得超过 $\pm 0.5^\circ$,方位角偏差不允许超过 $\pm 8^\circ$,超过这个偏差将无法钻至预判堵塞点位。

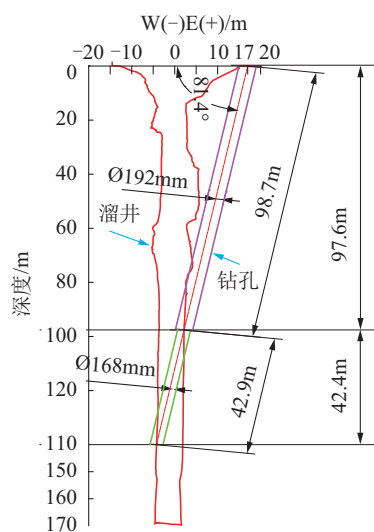
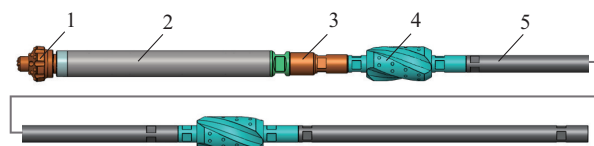


图4 ZK1斜孔钻孔结构设计示意

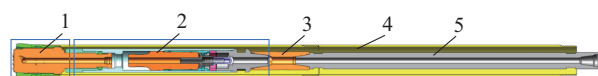
钻具组合:一开钻具组合如图5所示, $\varnothing 192\text{ mm}$ 硬质合金直钎+DHD360高风压潜孔锤+变径接头+ $\varnothing 89\text{ mm}$ 矿用钻杆(1.5 m)+ $\varnothing 182\text{ mm}$ 螺旋扶正器+ $\varnothing 89\text{ mm}$ 矿用钻杆(3 m)+ $\varnothing 182\text{ mm}$ 螺旋扶正器+ $\varnothing 89\text{ mm}$ 矿用钻杆;二开钻具组合如图6所示, $\varnothing 168\text{ mm}$ 同心跟管钻具+DHD350高风压潜孔锤+变径接头+ $\varnothing 168\text{ mm}$ 套管+ $\varnothing 89\text{ mm}$ 矿用钻杆。

为了防止ZK1孔钻进过程中产生过大偏斜,一



1— $\varnothing 192\text{ mm}$ 硬质合金直钎;2—DHD360高风压潜孔锤;3—变径接头;4— $\varnothing 182\text{ mm}$ 螺旋扶正器;5— $\varnothing 89\text{ mm}$ 矿用钻杆

图5 ZK1孔一开钻进钻具组合



1— $\Phi 168$ mm 同心跟管钻具;2—DHD350 高压潜孔锤;3—变径接头;4— $\Phi 168$ mm 套管;5— $\Phi 89$ mm 矿用钻杆

图6 ZK1孔二开钻进同心跟管钻具组合

开钻具采用具有导向定心功能的硬质合金直钎,同时设置了两组小间隙螺旋扶正器以提高孔斜精度。

2.3 近端垂直孔钻进方案

1号溜井疏通任务紧急,钻进远距离斜孔的同时紧急开挖了井口西南至西北侧的井口喇叭状松散层,降低井口标高、缩小坚硬层口径。都江堰某水泥公司在1号溜井顶部距井壁4~5 m的范围内,采用空气潜孔锤快速成孔工艺,开展钻孔直径为 $\Phi 150$ mm垂直爆破孔施工,孔位平行于井壁。考虑到井内堵塞位置和数量的不确定性,设计了2个垂直爆破孔以增加疏通成功率。具体设计如下:ZK2爆破孔,距井壁4.5 m,深度130 m;ZK3爆破孔,距井壁4 m,深度120 m,ZK2、ZK3钻孔位置信息如图7所示。

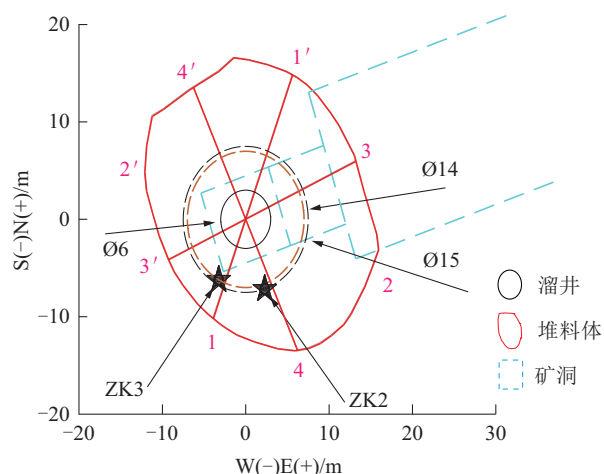
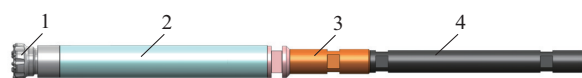


图7 垂直爆破孔孔位示意

钻具组合如图8所示, $\Phi 150$ mm硬质合金直钎+DHD350 高压潜孔锤+变径接头+ $\Phi 89$ mm矿用钻杆。



1— $\Phi 150$ mm 裸孔直钎;2—DHD350 高压潜孔锤;3—变径接头;4— $\Phi 89$ mm 矿用钻杆

图8 近端垂直孔 $\Phi 150$ mm空气潜孔锤裸孔钻具组合

2.4 近端斜孔钻进方案

2.4.1 确定孔位

在已开挖的井口处,选择与地层产状接近垂直的径向线作为钻孔位置,尽量将孔位布置靠近井壁。通过现场测量与比对,确定在3—3'井径线距井壁4 m处设置孔位,如图9所示,并采用斜向钻进方式。此方案可有效减小地层产状对钻孔的影响,同时,较短的井壁距离降低了对钻孔方位角精度的要求,从而降低了斜向钻进至井内堵塞矿料区的难度。

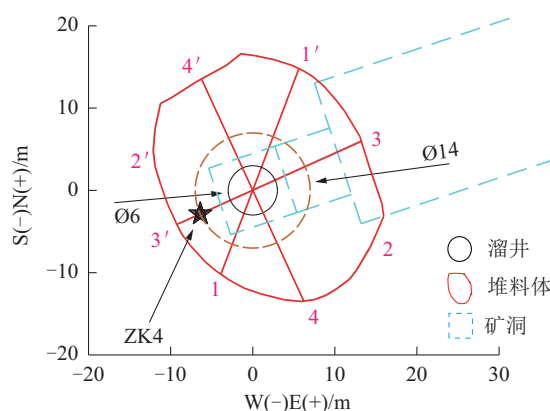


图9 ZK4斜孔孔位示意

2.4.2 钻孔结构和钻具组合

斜孔ZK4点位所处表层是弱风化松散层(深度10 m左右),中下部为完整石灰岩层,也可能存在少数裂隙和部分松散夹层。因此,斜孔ZK4开孔采用 $\Phi 245$ mm空气潜孔锤同心跟管钻具穿过表层,在未进入溜井前的较完整岩层中采用 $\Phi 192$ mm空气潜孔锤裸孔钻进,进入井中料仓后采用 $\Phi 168$ mm空气潜孔锤同心跟管钻进工艺,钻至井中预判堵塞点。

图10为ZK4斜孔钻孔结构设计,钻孔倾角 87° (钻孔顶角 3°),方位角 66° 。该孔为三开钻孔结构:一开口径为 $\Phi 245$ mm,采用 $\Phi 245$ mm空气潜孔锤同心跟管钻具钻进,该孔段钻进长度9.5 m,一开完成后起钻, $\Phi 245$ mm套管留置钻孔保护孔壁;二开口径为 $\Phi 192$ mm,采用 $\Phi 192$ mm空气潜孔锤裸孔钻进,该孔段钻进长度49 m(对应溜井深度为58.5 m),钻孔完全进入溜井内;三开口径为 $\Phi 168$ mm,下入 $\Phi 168$ mm跟管钻具组合,进行空气潜孔锤同步跟管钻进,在溜井内破碎矿料中进行同步成孔护壁钻进,钻进长度76.7 m(对应溜井深度140 m)。该钻孔结构若能精确实现,58.5~135.2 m钻孔段处于溜井内,对应溜井深度为63.4~140 m,全面覆盖所有预判堵塞

点位,在孔内下端预埋40 m长的炸药,可一次性破碎所有堵塞矿料。在实施过程中,孔斜角偏差不可超过 $\pm 1^\circ$,超出该偏差将无法钻至预判堵塞点位。

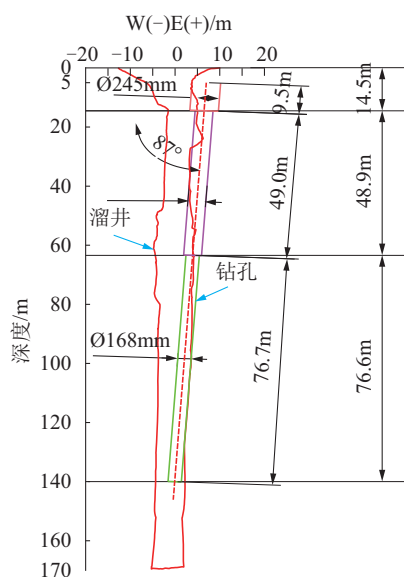
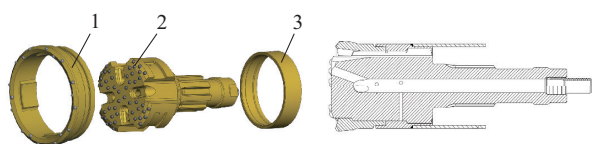


图10 ZK4斜孔钻孔结构设计示意

钻具组合:一开钻具组合:Ø245 mm同心跟管钻具(图11)+DHD360 高压潜孔锤+Ø245 mm套管+变径接头+Ø89 mm矿用钻杆+Ø245 mm套管;二开钻具组合:Ø192 mm硬质合金直钎+DHD360 高压潜孔锤+变径接头+Ø89 mm矿用钻杆(1.5 m)+Ø182 mm扶正器+Ø89 mm矿用钻杆(3 m)+Ø182 mm扶正器+Ø89 mm矿用钻杆;三开钻具组合:Ø168 mm同心跟管钻具+DHD350 高压潜孔锤+Ø168 mm套管+变径接头+Ø89 mm矿用钻杆+Ø168 mm套管。



1—套管钻头;2—中心钻头(对心钻头);3—套管靴

图11 Ø245 mm同心跟管钻具

2.5 钻孔设备

在空气潜孔锤快速钻进工艺中,主要钻孔设备包括钻机和空压机。根据钻孔设计方案选择合适的设备,确保设备各项功能参数满足钻孔需求。钻机采用YGL-100A型全液压履带工程钻机,配备92 kW柴油发动机,最大钻孔直径为Ø250 mm,钻

进深度可达160 m。该钻机的动力头最大输出扭矩为7000 N·m,总质量为8600 kg,桅杆具有多自由度变幅机构,能够实现多方位广角度钻孔功能。空压机采用XHP1070型柴油螺杆移动式空压机,配备298 kW柴油发动机,额定输出高压空气压力为2.4 MPa,输气量为30.3 m³/min,总质量为6900 kg。

3 定向保直钻进技术在溜井段爆破孔的应用

3.1 远距离倾斜爆破孔实施

考虑钻进过程中重力的影响,ZK1孔预留提前量比设计上翘了2°,远端斜孔实际钻孔的开孔顶角为6.5°,由于测量误差,实际开孔方位角为150°,偏离设计值5°,小顶角时钻机桅杆的方位放置精度较差,但该偏差在允许范围内。采用Ø192 mm空气潜孔锤裸孔钻具快速钻进,钻进深度110 m,未能成功穿过井壁进入料仓。钻进过程中,多次采用CAV-1型钻孔测斜仪进行孔斜测量,钻孔轨迹测量数据见表1,从测量结果可知,顶角由6.5°增大至12.5°,钻孔发生了向上弯曲,方位角在61 m处突然减小,加速偏离井壁方向。根据测斜数据,按开孔方位计算钻孔应在孔深76 m提前进入井壁,但在56~66 m段,钻孔方位出现了3.5°变化,叠加开孔方位5°的偏差,导致钻孔从井壁东北方向偏离了溜井。

ZK1孔实际开孔的方位偏差与地层的自然造斜

表1 ZK1孔斜测量数据

序号	孔深/m	顶角/(°)	方位角/(°)	温度/(°)
1	86.00	12.09	143.85	11.24
2	81.00	12.24	143.74	11.42
3	76.00	11.87	143.98	11.77
4	71.00	12.05	144.30	11.85
5	66.00	12.21	144.62	12.10
6	61.00	11.12	146.78	11.80
7	56.00	12.63	149.32	11.84
8	51.00	12.53	149.82	12.52
9	46.00	12.54	149.62	12.84
10	41.00	11.48	150.55	12.84
11	36.00	9.93	150.01	13.18
12	31.00	8.31	149.41	13.32
13	26.00	7.77	149.06	13.80
14	21.00	7.66	150.75	14.26
15	16.00	7.42	150.44	14.34
16	11.00	7.19	140.01	14.42
17	6.00	6.53	151.55	14.98

导致了钻孔偏离溜井,且造成钻孔顶角大幅增大,严重偏离设计初值,即使方位与设计相符,ZK1孔也无法钻至堵塞点,而在井深106 m左右处穿透整个溜井进入对面基岩中。ZK1孔实施过程中虽然采用了多种防偏斜保直技术手段,如设置扶正器、使用空心导向钻头及小钻压钻进,但未能克服4—4'井径线方向地层产状对钻孔造斜的影响。

3.2 近端垂直爆破孔实施

采用高风压空气潜孔锤(裸孔)快速成孔工艺,在两天内成功完成了ZK2、ZK3两个垂直爆破孔钻进工作,平行井壁钻孔直径均为 $\Phi 150$ mm。实际钻孔深度分别为130、120 m,平均机械钻速达到10 m/h。由于地层存在破碎裂隙发育夹层,钻孔过程中两个钻孔均发生了孔内掉块及少量垮塌,快速成孔后,下入PVC管进行简易护孔处理,而后下入预制炸药进行爆破。然而,两个孔的爆破未能炸穿料仓堵塞点,疏通工作未达到预期效果。

虽然裸孔空气潜孔锤快速成孔工艺在钻孔速度上具有明显优势,但其孔斜较难控制。以130 m深的钻孔为例,若发生1°的偏斜,孔底水平位移将达到2.3 m,且孔斜方位无法精确控制,主要受地层因素的影响。在距离井壁仅4 m的ZK3孔中,叠加钻孔偏斜引起的水平位移,实际爆破孔与井壁的距离将 ≥ 6 m,这使得孔内的预制炸药难以有效炸穿孔壁,进而无法炸散料仓堵塞点。

3.3 近端斜爆破孔实施

3.3.1 ZK4斜爆破孔施工

近端斜孔ZK4孔采用 $\Phi 245$ mm空气潜孔锤同心跟管钻具开孔,实际开孔顶角为3°,方位角为66°,开孔过程中,每进尺0.2 m需使用地质罗盘、全站仪对钻孔(套管及钻杆)的顶角及方位角进行校核,若出现偏差,起拔0.3~0.5 m重新钻进,反复多次直至钻进深度 > 3 m后,顶角及方位角不再发生变化。

在ZK4孔的钻进过程中, $\Phi 245$ mm空气潜孔锤同心跟管钻具成功钻进至12 m,完全穿透表层松散层并进入较为完整的岩层。随后换用 $\Phi 192$ mm空气潜孔锤裸孔钻具钻进至42 m时,出现轻微掉块和卡钻现象,但返气量未明显减少,推测可能进入了破碎夹层。钻进至45 m时,重新进入完整岩层,继续钻进至52 m时发现孔口返渣和气量明显减少,推测可能已进入溜井内的矿料堆。换径前,测量孔斜确保其符合要求,之后下入 $\Phi 168$ mm空气潜孔锤同

步跟管钻具进行护壁钻进。此阶段采用较小钻压,直到钻进至145 m时,进尺速度明显加快,且孔口无气体返出,判断可能已经钻穿卡堵料仓,停止钻进。

停止作业10 min后,溜井内传来巨响,随之扬起大量粉尘。矿料发生垮塌并下坠,井内矿料面高度下降了40 m。钻孔中的钻杆和 $\Phi 168$ mm套管被拉入溜井,钻具的急速下落导致钻机动力头也被拉至地面。下方平硐二次破碎矿料时,溜井内的矿料面高度并未下降,处理完下落的矿料后确认1号溜井40~140 m段仍处于堵塞状态。ZK4发生被动溜钻后,打捞孔内剩余钻杆时,发现 $\Phi 192$ mm裸孔内仍有部分变形的 $\Phi 168$ mm套管未完全掉入溜井下方平硐,且无法进行打捞。ZK4孔无法继续使用,需重新进行钻孔爆破作业。

3.3.2 ZK5斜爆破孔施工

ZK5孔的施工工艺与ZK4孔基本相同,但根据ZK4孔的实际施工经验进行了调整,如图12,ZK5孔开孔位置相较ZK4孔向外平移0.5 m,开孔顶角为3.8°,相较于ZK4孔增加0.8°,方位角66°,两个钻孔水平投影形成稳定间距,整条钻孔轨迹与ZK4孔轨迹分离,钻进全程不会触碰、刮擦孔内残留变形套管,彻底消除钻具与旧套管干涉卡钻的风险。采用 $\Phi 245$ mm空气潜孔锤同心跟管钻具直接钻进至溜井内,直至跟管不再进尺(深度越深,套管跟进阻力越大)。在钻进过程中,全孔同步保护孔壁,避免破碎夹层导致卡钻。实际钻进至54 m时,成功穿透溜井内矿料堆,孔深58 m后钻进困难,平均钻速达到8 m/h。随后换径下入 $\Phi 168$ mm空气潜孔锤同步跟管钻具,钻至143 m后停止钻进,平均钻速达到15 m/h。下入预制炸药进行爆破,成功疏通了1号溜井。

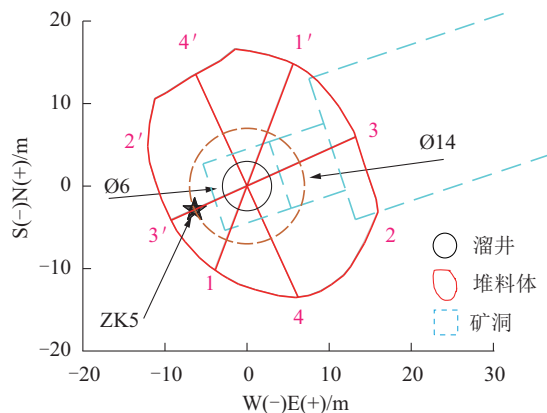


图12 ZK5斜孔孔位示意

3.4 溜井段爆破孔钻进技术总结

基于已完钻疏通爆破孔的施工经验,通过利用空气潜孔锤钻进速度快的优点和同心跟管钻具同步护壁和定向保直等特点,有效保证钻孔孔斜精度,在堆积松散矿料中提供了高精度的爆破孔。1号溜井紧急疏通作业的重难点分析可为今后业界类似钻孔工作提供借鉴,具体如下:

(1)高精度与快速钻进的双重要求。1号溜井疏通爆破孔施工要求高精度孔斜和快速成孔,为紧急疏通作业提供了多种钻孔方案和空气潜孔锤钻进工艺。成功实施的经验为应急爆破孔施工提供了宝贵的技术积累。

(2)爆破孔设置与安全控制。为确保安全施工,孔位需远离井壁(≥ 4 m)。采用近端垂直爆破孔方案,成孔后爆破产生的岩块与溜井内的堵塞矿料产生挤压,在爆破产生的岩台中架桥,加剧了堵塞。

(3)倾斜钻孔方位角控制。小倾斜角钻孔的开口方位角控制较为困难,尤其是斜孔爆破孔的施工,需进行实时监控,反复校核调整孔口套管的角度直至不再发生变化。孔位应尽量靠近井壁,并避免地层产状的影响,以降低方位角控制的精度要求。

(4)空气潜孔锤钻进工艺的局限。空气潜孔锤钻进工艺成孔速度快,但裸孔钻进在钻压和孔底锤头的摆动下容易产生较大的孔斜变化。目前,国内尚未实现空气潜孔锤的主动定向控制,影响了钻孔轨迹的精确度。

(5)同心跟管钻具的适用性与优势。空气潜孔锤同心跟管钻具能在强造斜地层中保持定向保直,保证钻孔的方向和直线度。与其他钻进方式相比,具有良好的定心中功能和同步护壁优势,特别适合在复杂地层中进行高精度爆破孔施工。建议采用波形螺纹套管,其螺纹强度高、连接牢固可靠,优于套管的梯形螺纹,能有效提高钻孔深度、钻孔安全性和钻孔成功率。

4 结论与建议

(1)近端斜孔使用具有定向保直特性的空气潜孔锤同心跟管钻具成功穿透堵塞段,高精度爆破孔的快速建立有效疏通了溜井。

(2)采用潜孔锤跟管钻进技术,ZK5疏通爆破孔0~68 m孔段平均钻速8 m/h,68~143 m孔段平均

高达15 m/h。

(3)不建议近端垂直爆破孔施工,为确保施工安全,孔位需远离井壁(≥ 4 m),若小于该距离,爆破当量过大会严重影响溜井完整性,爆破当量不够则无法疏通堵塞点,反而会加剧堵塞。

(4)空气潜孔锤钻进工艺成孔速度快,但裸孔钻进在钻压和孔底锤头的摆动下容易产生较大的孔斜变化,在后续研究中建议增加孔内数据分析采集系统,实现地下-地面实时响应和轨迹控制。

参考文献:

- [1] 赵会波,汤正.煤矿超600 m垂直输料井快速钻井工艺及其关键技术[J].煤矿安全,2024,55(8):234-241.
- [2] 路增祥,马驰,曹朋,等.金属矿山溜井问题研究现状及方向[J].金属矿山,2019,48(3):1-9.
- [3] 叶海旺,赵昀,欧阳枫,等.平硐溜井系统矿石运动状态及井壁破坏数值模拟[J].金属矿山,2017(11):18-22.
- [4] 龚爽,赵毅鑫,周磊,等.冲击荷载作用下含双孔洞裂纹石灰岩动态断裂行为[J].煤炭学报,2023,48(8):3030-3047.
- [5] 明世祥.地下金属矿山主溜井变形破坏机理分析[J].金属矿山,2004,33(1):5-8.
- [6] 牛帅,刘少伟,樊克松,等.灰岩矿溜井开挖支护与降段爆破参数优化[J].河南理工大学学报(自然科学版),2024,43(5):28-35.
- [7] 宋卫东,王洪永,王欣,等.采区溜井卸矿冲击载荷作用的理论分析与验证[J].岩土力学,2011,32(2):326-332,40.
- [8] 张凤鹏,彭建宇,范光华,等.不同静应力和节理条件下岩体爆破破岩机制研究[J].岩土力学,2016,37(7):1839-1846,1913.
- [9] 范鑫.石灰岩地区溜井施工工艺及质量控制措施研究[J].工程机械与维修,2022(2):74-75.
- [10] 卢予北,王建华,陈莹,等.空气潜孔锤在松散地层中的钻进试验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(7):9-11,27.
- [11] 冉恒谦,张金昌,谢文卫,等.地质钻探技术与应用研究[J].地质学报,2011,85(11):1806-22.
- [12] 石永泉.潜孔锤钻进技术[M].成都:西南交通大学出版社,2013.
- [13] 赵建勤,李子章,石绍云,等.空气潜孔锤跟管钻进技术与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(7):55-59.
- [14] 王立峰,张晓昂,徐影.单体大直径空气潜孔锤钻井工艺研究及应用[J].中国煤炭地质,2021,33(8):65-67.
- [15] 迟焕鹏,胡志方,王胜建,等.黔西地区表层易漏地层钻井工程技术[J].钻探工程,2021,48(4):66-72.
- [16] 赵江鹏,郝世俊.气动潜孔锤技术在矿山事故钻孔救援中的应用[J].煤田地质与勘探,2022,50(11):24-34.
- [17] 张彪,康玉国,黄勇,等.矿山救援地面生命保障孔高效成孔关键技术[J].煤田地质与勘探,2022,50(11):14-23.
- [18] 温英明,张朝阳,雷文杰.中深孔定向钻进技术及煤矿中分支孔应用研究[J].煤炭技术,2022,41(7):37-41.
- [19] 罗开军.孔内孔间微差爆破间隔时间的合理选择[J].金属矿山,2006,35(4):4-6.
- [20] 李进华.溜井垮塌分析与治理方案[J].有色金属(矿山部分),2023,75(5):17-21,62.

(编辑 王文)