

金属矿开采天井机械破岩钻进工艺及关键技术分析

岳新强 高文凯 王立 舒世俊

新疆宝地矿业股份公司 新疆 乌鲁木齐 830000

【摘要】：本文以新疆松湖铁矿技改项目为例，系统研究含水破碎矿岩条件下天井机械破岩钻进工艺。通过分析 AT1000L 钻机选型适配性、工艺流程及“三孔”优化至“两孔”等关键技术，最终得出这种工艺能够达到平均每日进尺 8 米，爆破成功率高达 92%，且从本质上消除了高空作业等诸多安全隐患，为类似矿山天井工程机械化提供了可行性的参考方案和经济性评价方式。

【关键词】：天井钻进；机械破岩；含水破碎矿岩；工艺优化

DOI:10.12417/2811-0536.26.06.068

引言

金属矿山天井施工长期依赖人工钻爆法，尤其在含水破碎岩层中，存在效率低下、安全风险高等突出难题。为了能够达到安全、快速、连续性开挖的目标，加快机械化取代是必然趋势。针对上述问题，本文结合了松湖铁矿的实际情况，详细介绍了机械破岩钻进工艺的技术体系以及关键技术措施的研发情况。希望对于复杂地层条件下的矿山采切工程施工改革可以起到一定的实践指导作用并为其提供科学依据。

1 机械破岩钻进工艺系统分析

1.1 设备选型与适应性分析

金属矿山竖井机械化施工能否成功，首先取决于设备选择是否能适用于复杂的井下空间环境以及地质条件，在新疆松湖铁矿的应用实例中，在选用 AT1000L 切割式天井钻机之前必然要对机器进行严格的“入井适用性”评估，不仅要考察该设备基本性能指标，更要判断这台设备是否能够安全顺利地通过地下采矿场的运输通道。松湖铁矿设备入井需要穿过截面为 3.8 × 3.6 米的半圆拱巷道并绕过仅 6 米的弯道，这就要求了钻机的运输型式尺寸必须足够小巧才能顺利入井，另外井下工作面比较狭窄，设备工作状态下所占据的空间大小以及底盘距地面的最小距离都直接影响到这辆钻机能否在切割巷内方便快捷地安装移动，再来看看岩石条件，松湖铁矿围岩破碎，稳定性系数 ($f=4-8$) 较低，并伴有裂隙渗水情况，这就意味着钻机要有很强的导孔推进力量和扩孔拉拔力度以保证在钻孔过程中不会发生卡钻、偏斜等情况，而 AT1000L 钻机高达 1800kN 的最大推力和 100kN.m 的扭矩正是其能在破碎含水岩层中顺利钻进的动力来源，所以设备的选

择绝对不是简单的性能参数比较，而是结合巷道几何形态、岩石物理机械性质、设备自身动力性能以及后期保养检修便利程度的全方位系统工程，其本质是使“设备下得去，站得稳，钻得动”。

1.2 施工工艺流程

切割天井钻机施工是一个相互联系的连续工艺流程，简要来说就是“导孔布线、扩孔造缝、水力排渣、爆破成井”。首先是导孔施工，是这个流程的“地基”部分，工作人员选用直径 190mm 的钻杆，自设计孔位中心向井底开钻，最开始的两米低钻压慢速钻进，好似给整孔“拉直线”，目的是防止孔口震裂钻孔发生偏斜，保证导孔的垂直程度及精度，以便于后期扩孔的时候拥有一条准确无误的“路线指引”。当导孔打通以后，施工就进入下一个扩孔步骤，钻机更换专门的扩孔刀盘，沿着导孔所形成的路线进行反向扩挖，最开始三米需要导孔钻杆引领才能使刀盘稳定，随后就可以卸掉导孔钻杆，由刀盘自行上行切削岩石，逐段将孔径扩大到 700 毫米。在这个过程中，被切割下来的岩渣与不断注入的排渣水混合在一起，形成了一种泥浆状的液体，经由封闭的管道被源源不断地输送到工作面后面的渣堆里，实现了排渣的自动化、干净化。彻底改变了以往人工扒渣时的恶劣环境。然后便是借助之前所造出的这一个 700 毫米直径的空孔作为理想的爆破临空面，在它的周围再钻若干个直径 80 毫米的装药孔，通过精心的设计，将几个钻孔之间的岩体一次性崩塌下来，从而形成了切割所需要的方形或矩形的天井孔。全部过程既采用了机械破岩的精确性以及高效性又结合了爆破的低成本特性，是一种典型的“机械—爆破”组合成井方式^[1]。

1.3 现场布置与辅助系统

再先进机器,如果没有良好的场地布置及有力设施保证也是无法发挥其作用的。对于机械破岩钻进法,对作业环境的“微气候”的要求比起常规法要更加严格了。首先是电力供应问题,钻机运转功率达到了70kW,而且要保持较长时间连续工作,所以一定要设计合理的供电系统。松湖铁矿的做法就是按照不同的施工分区,就近连接到采区变电硐室供电,并采用WD-MYJY23型矿用电低烟无卤阻燃电缆,既解决了高功率电力需求的问题,又考虑到了井下的防火安全问题。供水则是直接采用地面干净水源,由高位水池引入,保证了冷却以及排岩的用水质量,以防泥沙磨坏液压系统或者堵塞输渣管道。其次作业平台的调整,AT1000L的钻机本身体积也很大,在安装、定向和出渣运输方面都要求对原先预留好的架台位置进行一定调整,把底板向下挖掘(降底)半米来提高工作的高度,有时还需要开挖巷壁一侧(扩帮),以方便机器设备的搭建与检修。虽然增加了前期的工作量,但却是后期机器能够顺利工作的前提条件。

2 关键技术分析与优化路径

(1)布孔方案优化:布孔方案优化是降低综合成本、提高施工工效最直接的切入点,关键是围绕着如何在保证成井质量及良好的爆破效果的情况下,找到“孔数、孔距与爆破效果”的合理结合点。松湖铁矿布孔优化经历的过程就是一个由“保险”向“经济”逐步过渡的案例。项目开始之初,面对复杂的地下水破碎区段,为了试验的成功采取了相对保守的“三孔品字形”布孔方式。三个直径700mm的钻孔呈三角排布,孔距1.2~1.4m,该种布孔方式为之后的扩孔爆破提供了充足稳定的原始自由面。成功率达到了百分之百,但是也是成本最大的一种布孔形式,随后随着信息和技术数据的积累,在较软的东端矿体较理想的地段大胆尝试了更为冒险的“两孔”布孔,事实证明对于适合的地方,可以将钻孔缩减为2个,经过合理的布置周围扩孔的孔网布置以及装药结构,同样能形成符合要求的切割竖井。此次的优化并非简单的减孔,而是在精确计算了钻孔位置,在爆破方案的基础上弥补了因少了一段空孔而导致的爆破自由面损失。从结果上看,两孔法使得整个成孔过程中的总进尺减少了1/3,直接节省了钻孔费用以及作业工期。如以单井深16米为例,优化后就直接节省费用44200元,工期减少明显,这种“根据地势,循序渐进”的布孔方式,为在复杂采矿地质条件下推广机械化天井钻进提供了宝贵和可借鉴的成本优化思路^[2]。

(2)钻进参数控制:在裂隙发育含水的岩层中驾驭大型钻机,就如同在泥泞路面下行驶重型卡车,对于“油门”和“方向盘”的把握必须足够精准。钻进参数的掌握直接影响到钻孔垂直精度及成孔质量,甚至是设备的安全。其中最为重要的是在导孔过程中的参数的控制,在松湖铁矿施工过程中,操作手严格实行了“慢启稳进”的方针:在开孔2米内,以低于额定数很多的低钻压和低转速,小心翼翼的为整个钻孔“打桩”。目的就是为了防止钻头在破碎的孔口处打滑或晃动而跑偏,更为之后入孔的钻杆提供了一个很好的导向方向。待钻杆进入岩体一段距离并得到一定的导向保护后,才会把导孔推力逐渐提高到机器所许可的最大限度,同时配合相应的转速,实现快速、垂直的向上穿通。而在扩孔的过程当中,则主要把控好拉力与扭矩这两个指标。由于裂隙发育岩体容易产生局部垮塌或者卡钻的情况,因此操作手需要时刻观察仪表盘中的扩孔拉力以及扭矩的变动情况,一旦发现有异常变动,就需要及时作出调整。需要通过多次的“拔杆—旋转—反洗”来进行处理异物,以防强行推进而导致切削圆盘破裂或者钻杆扭断。此外,对于存在裂隙水发育的特点,排渣水的压力、水量也是一个重要的调节参数,充足的水压且稳定才能保证岩石粉末能够及时并且顺利的带出孔外,而不是堆积在孔底压实糊钻。这就需要对推力、拉力、转速、水压等等都进行适时的、精确性的调节,这种调节是将机械效能转变为具体进尺产量的重要技术手段。

(3)成井与扩爆协同工艺:机械化钻孔的最终结果,要靠爆破来“揭晓”“验收”,其机械钻孔与爆破扩井二者之间的配合,决定了切割天井最终成型质量和拉糟的好坏程度,本质上是机械“精准预设”+爆破“艺术雕刻”的过程。AT1000L型钻机所形成的700mm口径的标准圆孔,给爆破提供了接近完美的、精准的自由面。在此之后围绕这些“预设孔”所钻的扩爆孔($\phi 80$),其孔距、角度、深度的设计都需要以预设孔的空间分布为基础进行精密的计算。松湖铁矿的台账记录,反映了不同的布孔模式下的配合差异,三孔方案下自由面多、空域大、周向扩爆孔装药相对均匀;爆后天井断面规顺、眉线(天井与巷道交界处轮廓)保护良好;炮响率高而稳定。而在改用两孔方案后,配合难度加大。比如在2440m分段CM26切割巷道试验中,为了弥补少了一个自由面,爆破设计上采取适当加大单孔装药量的办法,使炸药单耗由三孔方案时的约0.38kg/t上升到0.46kg/t,最终虽然达到了崩落矿石的目的,但是爆破振动加剧,“两侧眉线口

被破坏严重”。这就体现了相互配合的关键在于：机械布孔方案的改变，必须联动相应的调整爆破参数。后续在 2380m 分段试验中，通过调整扩爆孔与机械孔的距离，调整装药结构，在获得较好爆破效果的同时降低了对巷道轮廓的损伤。所以，真正意义上的配合并不是各干各的，而是要把机械布孔作为爆破设计的一个不可或缺的条件来进行整体设计与动态调整。

3 应用效果与经济效益分析

(1) 安全效益分析：比起可以通过数据量化的效率增长，机械化破岩钻进所带来更大的不可量化的安全保障效果。这正是针对矿山生产的最大隐患，人！长期以来，人工钻井切割天井被认为是最危险的地下作业工程之一，从业人员需要在一个狭小、高处、通风条件差的独立巷道中忍受长期处于各种风险因素叠加的恶劣环境中，高空作业、中毒窒息、冒顶片帮、爆破事故等等每一项都足以致命。松湖铁矿使用掘进钻机后，实现了划时代的“人机分离”“本质安全”。从钻进开始，施工者一直处于切割巷道坚实的顶板之下，通过对设备的无线或面板控制来指挥机械进行作业，完全脱离了高空和破碎的工作面；钻孔出碴一系列工序全部在机器内封闭式进行，杜绝了扒渣时石头滚动的风险，也大大减少了粉尘。施工前对巷道的下降和顶部加固也为设备提供了安全的基础^[3]。

工作环境的巨大变化也让原本无法百分百排除掉的“小概率大灾难”级别的安全隐患从根本上被消解掉。据统计，在使用了新的技术手段之后，相对应的矿区再没有出现一例与切割天井有关的轻伤以上安全事故，这样无可替代的安全效益不是金钱能够轻易换算出来的，它减轻了企业管理负担以及事故发生时的赔偿费用，但更为重要的是它给予工人们的巨大心理安全感、归属感，体现出了以人为本的现代矿山企业管理理念，带来了无法估量的社会效益和安定效果，这是支撑矿山企业长足发展的无形力量。

参考文献：

- [1] 刘志强,宋朝阳,王强,等.金属矿开采天井机械破岩钻进工艺及关键技术分析[J].有色金属(矿山部分),2024,76(6):42-50.
- [2] 刘树新,庄宇,戴谦君,等.盲天井中深孔掏槽爆破布孔优化及围岩损伤数值分析[J].金属矿山,2024(12):44-51.
- [3] 李闯.无底柱分段崩落采矿法采场拉槽方式优化研究[J].2025.
- [4] 郭鸿德,杨晓飞,刘国栋,等.充填体下切割天井一次爆破成井技术研究与应用[J].有色金属(矿山部分),2024,76(2):6-13.

(2) 经济效益评价：任何新科技的应用最后还是要通过经济性来考核。对于机械破岩钻进施工工艺进行经济性评估，不能单纯看直接费用指标，要树立以安全、效率、工期等多因素综合在内的全成本理念。单论直接费用方面，现阶段外包施工单价达 2760 元/米，的确超出传统人工开挖的直接劳动材料费。但这并不是正确的比较方式，一方面，新工艺极大降低了隐形“安全成本”。如高额风险津贴、专项保险、潜在的事故处理、停工损失等，这部分成本很高，却不容易计算^[4]。

另一方面，施工效率提高带来的工期节省效益也很明显。时间就是产量，早一天完成切割槽，就意味着一个采矿区可早一天开始开采，其边际效益远远大于钻孔费用本身差异。松湖铁矿的技术改进已经给出了降本方向：在技术层面上削减无效进尺。“三孔成井”到“两孔成井”的转变，一个天井就减少了三分之一钻孔进尺，直接节省成本约为 4.42 万元，单考虑后续的 12 个天井中按规划采取“两孔方案”的 7 个，则会节省施工费、电费共计 33.24 万元。长远来看如果矿山自购设备或者形成区域共享机制，还可摊薄昂贵的机械设备折旧和外包利润，使每米的成本更低。所以它的经济效益模型是“前期投入较高、后期获益点多、综合收益较好”。所节约的不仅是账面上的数字，更是整条生产链条顺滑运转、整体安全生产形势根本转好，以及企业技术创新能力的持久增强等效益，是一笔战略性投资。

4 结语

事实表明，机械破岩钻进工艺应用于松湖铁矿天井施工中，大幅度提高了开挖天井进度及固有安全保障程度。通过对布孔方案、钻进取心参数以及联合作业爆破技术的研究，形成可借鉴的技术方法体系。机械破岩钻进工艺在解决了原有作业方式中的安全隐患的同时，“降本增效”的途径也值得借鉴，为金属矿开采矿山的开采进程机械化以及安全可靠生产提供了实际可行的技术指导。