微型凿岩台车在急倾斜薄矿脉开采中的应用研究*

颜武刚[1],张连军[2],王锋[1],代建龙[1],尹千才[1],未崴[1]

(1.湖南创远高新机械有限责任公司, 湖南 长沙 410205;
2.安标国家矿用产品安全标志中心有限公司, 北京 100013)

摘要:针对国内急倾斜薄矿脉浅孔留矿采矿法开采存在采幅过大、矿石贫化率高、机械化程度低、安全风险高等问题,以国内某金属矿赋存条件为工程应用背景,提出了浅孔留矿法机械化开采工艺,确定了采用微型凿岩台车上向浅孔凿岩的机械化开采思路。首先,基于试验采场的作业条件,确定了微型凿岩台车的设计原则和主要技术参数;其次,整机采用模块化和4个自由度凿岩定位的设计方案,对微型凿岩台车狭小复杂环境下的通过性、凿岩定位、整机稳定性和原地转向驱动系统进行了计算和模拟分析。结果表明,微型凿岩台车可满足急倾斜薄矿脉浅孔留矿法开采狭小空间转场行驶、凿岩定位及视距遥控作业的实际工程应用,单孔进尺速度最快可达2.2 m/min,人工凿岩平均效率为1.35 m/min,设备凿岩效率为1.69 m/min,综合凿岩效率比人工凿岩效率提升25%以上,同时,通过视距遥控可有效减少作业人数、减小采幅、降低安全风险和提升综合开采效率,为开采倾角>65°、脉厚<0.8 m的急倾斜薄矿脉机械化改选提供装备方案参考。

关键词:微型凿岩台车;急倾斜薄矿脉;浅孔留矿法;机械化开采;视距遥控

中图分类号:TD421.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)09-0192-08

Application of Micro Rock Drilling Rig in the Mining of Sharply Inclined Thin Ore Veins

YAN Wugang[1], *ZHANG Lianjun*[2], *WANG Feng*[1], *DAI Jianlong*[1], *YIN Qiancai*[1], *WEI Wei*[1]

(1.Hunan Chuangyuan High-tech Machinery Co., Ltd., Changsha, Hunan 410205, China;
2.China Mining Products Safety Approval and Certification Center, Beijing 100013, China)

Abstract: In response to the problems of large mining range, ore dilution rate, low mechanization degree, and high safety risks in the shallow hole shrinkage mining method for sharply inclined thin ore veins in China, taking the occurrence conditions of a certain metal mine as the engineering application background, a mechanized mining process of shallow hole shrinkage mining method was proposed, and the mechanized mining idea of using micro rock drilling rigs to drill shallow holes upwards was determined. Firstly, based on the operating conditions of the experimental mining site, the design principles and main technical parameters of the micro rock drilling rig were determined. Secondly, the whole machine adopted the design scheme of modularization and 4-degree-of-freedom rock drilling positioning, and the passability, rock drilling positioning, machine stability, and in-situ steering drive system of the micro rock drilling rig were calculated and simulated in narrow and complex environments. The results show that the micro rock drilling rig can meet the practical engineering applications of narrow space transition driving, rock drilling positioning, and visual distance remote control operation in the mining of sharply inclined thin ore veins with shallow hole shrinkage method. The fastest single hole drilling speed can reach 2.2 m/min, the average of efficiency of artificialrock drilling is 1.35 m/min, and the drilling efficiency of equipment is 1.69 m/min, and the comprehensive rock drilling efficiency has been improved by more than 25% compared to manual rock drilling efficiency. At the same time, visual distance remote control can effectively reduce the number of operators, reduce mining amplitude, reduce safety risks, and improve comprehensive mining efficiency, which can provide equipment scheme reference for mechanized fransformation of steeply inclined thin veins with mining dip angle greater than 65° and pulse thickness less than 0.8 m.

Key words: Micro rock drilling rig, Sharply inclined thin ore vein, Shallow-hole shrinkage mining method, Mechanized mining, Visual distance remote control

* **收稿日期**:2024-09-26
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2903805)
作者简介:颜武刚(1985—),男,湖南长沙人,硕士,高级工程师,主要从事智能矿山装备研究。E-mail:yanwugang1985@163.com

0 引言

急倾斜薄矿脉在金属矿山中分布比较广泛，尤其是在钼、锡、金、银、钨等矿床中占比较大[1]，具有矿脉厚度小、空间变异性大、采场作业空间有限等特点[2]。在国内，开采薄矿脉主要还是以浅孔留矿采矿法为主，特别是以急倾斜薄矿脉为主的钨(锡)矿床开采中约占 70%[3]。浅孔留矿采矿法的使用比例虽大，但因其矿石贫化率高、开采作业极不安全、劳动强度大、生产效率低、经济效益差、开采难度大，严重影响了矿山企业的经济效益[4-6]。

张建波[7]、万相宗[8]、丁明飞[9]的研究中，采用浅孔留矿采矿法开采时凿岩工序均是以人工手持YT-24、YT-28 等风动凿岩机进行凿岩作业，作业人员长期暴露在空区，劳动强度大、安全风险高。为了解决急倾斜薄矿脉凿岩工序机械化的问题，国内许多学者主要针对充填采矿法进行了不同的探索。姚泽春等[10]采用 DF10B-1BD(T)型履带式液压凿岩台车实现了上向水平分层进路充填采矿法凿岩工序机械化；刘强等[11]提出采用凿岩台车、装药台车、撬毛台车等成套机械化设备回采的上向分层充填采矿法，提高了凿岩、装药、撬毛等工序的机械化水平、回采效率和安全性；杨建国等[12]提出通过采用阿特拉斯 Boomer K41 凿岩台车实现上向水平分层充填采矿法凿岩工序机械化。综上所述，在急倾斜薄矿脉机械化开采方面，目前国内对于机械化充填采矿法研究较多，而关于留矿法如何通过凿岩台车实现凿岩工序的机械化、通过视距遥控使作业人员远离空区等方面的研究甚少。

国外从 20 世纪 70 年代就开始研制微型凿岩台车[13-15]，自 1976 年法国塞科马(Secoma)公司制造出第一台小型凿岩台车以来，薄矿脉的凿岩设备迅速发展，1989 年该公司又推出了长度 8.6～8.9 m、宽度 1.2 m、高度 1.9 m 的 Quasar 凿岩台车；瑞典阿特拉斯·科谱柯(Atlas Copco)公司于 1990 年研制出了长度 7.7 m、宽度 1.22 m、高度 1.9 m 的 Boomer H104 型凿岩台车；1990 年国际圆粒金刚石有限公司研制出长度 10 m、宽度 1.5 m、高度 2.0 m 的 Mini-master 凿岩台车。

本文针对国内某矿山的赋存条件，提出急倾斜薄矿脉浅孔留矿法机械化开采工艺，基于此工艺和现场条件确定微型凿岩台车的主要技术参数和整机方案，并对作业空间和稳定性进行模拟分析，最后通过厂内测试和采场试验验证该设备的可行性，为实现急倾斜薄矿脉留矿法凿岩工序机械化提供装备支撑。

1 急倾斜薄矿脉机械化开采工艺

国内某金属矿矿体为钨锡石英脉，矿脉呈群状分布，矿脉厚度为 0.1～0.8 m，平均脉幅为 0.42 m，平均倾角为 70°，属于典型急倾斜薄细难采矿体。

该矿主要采用浅孔留矿法进行开采，凿岩爆破工艺相对粗放，采场结构参数局部偏大，回采过程中存在爆破块度不均匀、平场困难、劳动强度高、出矿困难等问题，严重影响开采的安全与效率，回采贫化率为 40%～80%，当开采极薄矿体时能达到 60%～80%，矿石贫化和损失居高不下，直接影响企业经济效益和长期发展。

针对当前开采过程中存在的问题，对采矿工艺进行优化，采用微型凿岩台车浅孔凿岩，1 m^3 铲运机出矿，微型撬毛台车辅助平场、撬毛和大块破碎作业。自拉底平巷中上采第一分层开始，自下而上逐层上向凿岩落矿，从无底柱平底结构各进路协同出矿，出矿后平场至矿堆平整，完成撬毛排险后，凿岩台车在矿堆上开始下一循环凿岩作业，浅孔留矿法机械化开采工艺如图 1 所示。通过应用微型凿岩台车等装备，降低劳动强度和开采贫化损失率，提高生产效率，解决施工人员长期暴露在无支护结构的破碎岩体下作业的安全问题，实现急倾斜极薄破碎矿脉的机械化开采。

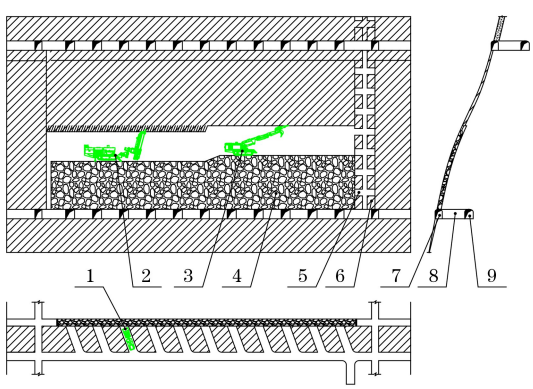


图 1 浅孔留矿采矿法机械化开采工艺

Fig.1 Mechanized mining technology of shallow hole shrinkage mining method

2 微型凿岩台车计算分析

2.1 微型凿岩台车整体方案设计要求

由于采场狭小，且矿脉倾角多变，为了适应采场的特殊环境，保证微型凿岩台车的灵活性、通过性和作业稳定性，按以下原则[16]进行设计。

(1) 整机宽度限定在 800 mm 以内,为了保证设备在矿堆上的通过性,采用静液压驱动的履带底盘,可以降低整机重心和高度,且复杂环境的通过性较轮式铰接底盘要好。

(2) 采用多自由度高适应性臂架系统,满足狭小空间臂架姿态调整和炮孔定位的要求。

(3) 为便于进罐笼和下井组装,整机采用模块化设计,拆卸组装方便,整体尺寸满足现场罐笼装运尺寸需求。

(4) 由于设备进入采场后,左右维护空间有限,为便于后续的维护检修,将电控箱、油泵、液压阀组等集成安装在车体的后部。

(5) 要充分考虑电气系统防护等级,可适应高热富水工作环境,保证凿岩作业时整机的可靠性。

综上所述,为了满足该矿急倾斜薄矿脉凿岩作业的要求,微型凿岩台车的主要技术参数见表 1。

表 1　微型凿岩台车主要技术参数

Table 1　Main technical parameters of micro rock drilling rig

长度/m	宽度/m	高度/m	坡度/(°)	速度/(km/h)
3.5	0.8	1.8	16	2.5

2.1.1　微型凿岩台车模块化设计

微型凿岩台车整机采用模块化设计[17],主要由推进器总成和履带底盘总成两大部分组成,推进器总成包含推进梁、推进油缸、摆动油缸、顶撑油缸和液压凿岩机等部件;履带底盘总成由左右履带、履带安装架、支腿、电机泵组、电控柜等组成,如图 2 所示。实际转场运输时根据罐笼和斜坡道尺寸可对推进器和履带底盘总成进行进一步拆解。

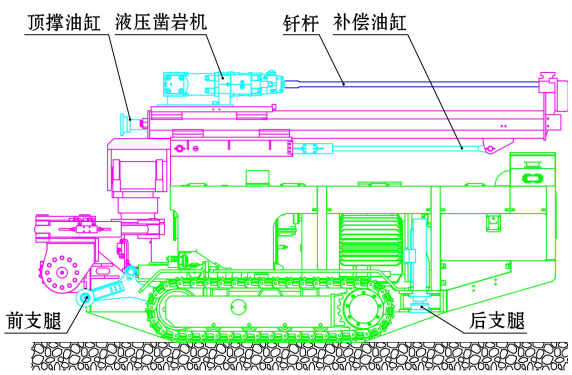


图 2　微型凿岩台车的组成结构

Fig.2　Structure of micro rock drilling rig

2.1.2　微型凿岩台车作业空间分析

(1) 复杂环境下通过性分析。

采场存在欠爆的情况,导致采场断面不规则、空间复杂多变,当采用浅孔留矿法开采时,放矿不均匀也会导致矿堆凹凸不平,影响微型凿岩台车行走转场时的通过性。为了提升设备在采场复杂环境中的适应能力,转场过程中可通过摆动油缸调整推进器总成的姿态,使得设备能够适应采场空间的变化,如图 3 所示。

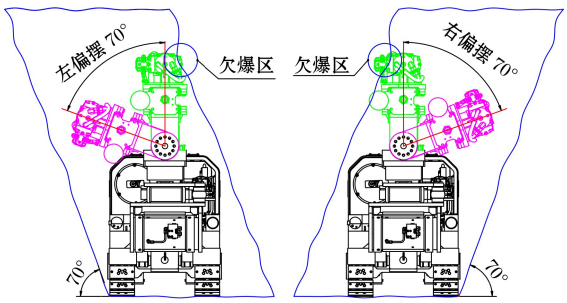


图 3　微型凿岩台车通过性模拟

Fig.3　Simulation of passability of micro rock drilling rig

由图 3 可知,当微型凿岩台车在采场中遇到欠爆等特殊情况影响通过性时,可向左或右偏摆推进器避开障碍物,左右最大偏摆角度为 70°,满足狭小空间行走转场的要求。

(2) 小采幅空间凿岩作业分析。

微型凿岩台车转场到采场后,设备沿矿体走向布置,按照"立机→定位→凿岩→移机→立机→定位→凿岩"的模式进行循环作业,直至完成整个采场的炮孔凿岩。

为了降低炸药单耗及减少爆破后采场壁面的超欠爆现象,采场采用矩形+间隔空孔的布孔方式[18],如图 4 所示,通过微型凿岩台车钻凿上向倾斜浅孔。为了提升凿岩效率,要求一次定位完成一排 2 个炮孔的钻凿,凿岩台车最小靠帮距不大于 200 mm。

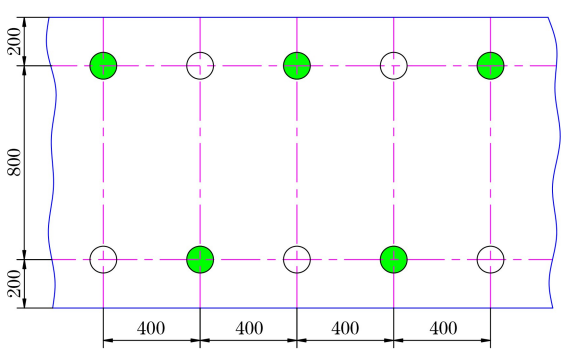
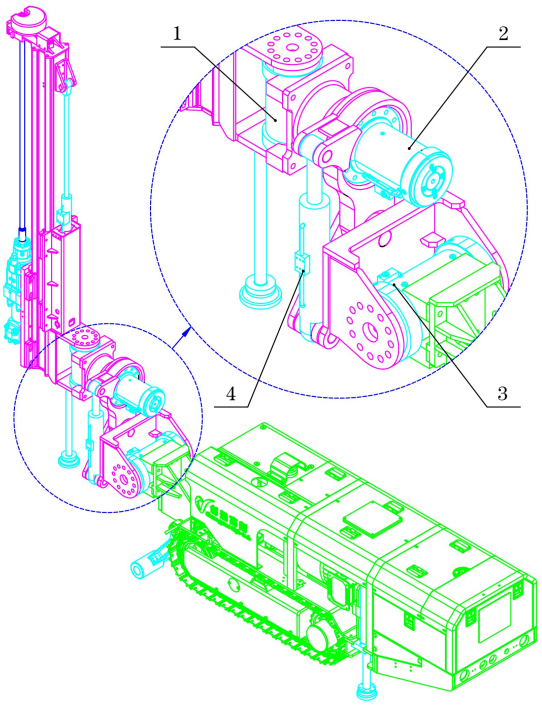


图 4　矩形+间隔空孔布孔方式(单位:mm)

Fig.4　Layout method of rectangular+spaced hole(unit:mm)

为了实现微型凿岩台车在小采幅狭小空间精确凿岩定位的要求，在推进器总成上设置 4 个自由度（3 个旋转自由度和 1 个平移自由度），通过单个自由度动作或者多个自由度复合动作实现快速凿岩定位，如图 5 所示。



1—自由度 F1（180° 摆动油缸）　2—自由度 F2（360° 摆动油缸）
3—自由度 F3（180° 摆动油缸）　4—自由度 F4（油缸）

图 5　微型凿岩台车的 4 个自由度

Fig.5　Four degrees of freedom of micro rock drilling rig

各个自由度的功能如下。

① 自由度 F3 主要用于凿岩作业完成后收机及设备在采场中立机。

② 自由度 F2 和自由度 F4 均可单独驱动推进器调整定位角度，自由度 F2 主要用于左右摆动调整推进器的横向位置，自由度 F4 主要用于调整炮孔倾斜角度，自由度 F2 和自由度 F4 的复合动作则可实现推进器的左右平动定位，满足一次定位完成一排 2 个炮孔的钻凿，如图 6 所示。

③ 自由度 F1 用于左右摆动调整推进器的位置，自由度 F4、F1 复合动作可调整推进器的靠帮距。

④ 4 个自由度相互配合可满足狭小空间的作业要求，以垂直孔为例，可覆盖 1 560 mm×600 mm 的作业范围，如图 7 所示。

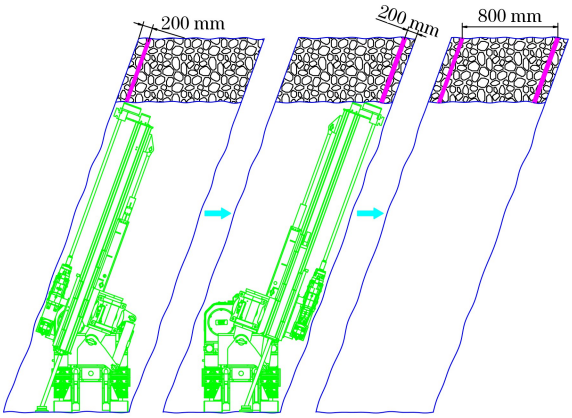


图 6　一次定位完成 2 个炮孔钻凿

Fig.6　Complete drilling of 2 boreholes in one location

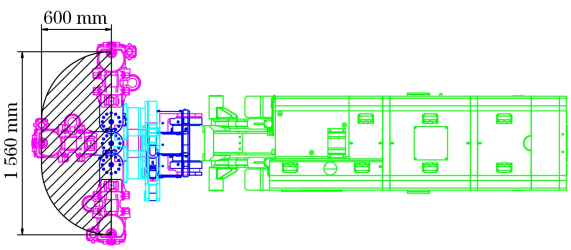


图 7　垂直孔钻凿作业范围

Fig.7　Scope of vertical hole drilling operation

2.1.3　微型凿岩台车行驶及作业稳定性分析

在急倾斜薄矿脉中采用浅孔留矿采矿法开采时，每次放矿后留矿堆高低不平，因此，设备在采场复杂条件下的行驶及作业稳定性至关重要。

（1）行驶稳定性分析。

平路行驶时，速度相对较快，考虑到行驶过程中的加减速及停止时的惯性冲击，设备的重心应尽可能在设备中心位置。通过计算分析，设备实际的重心位置如图 8 所示，基本处于中心位置，满足使用要求。

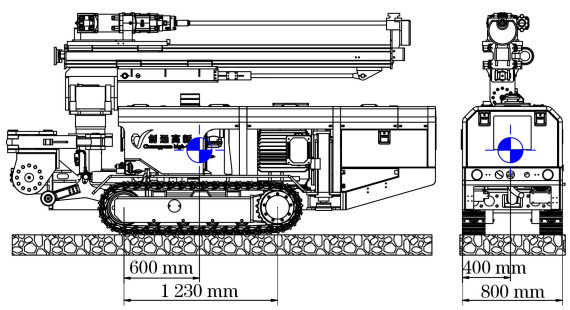


图 8　平地行驶稳定性分析

Fig.8　Stability analysis of flat driving

当在 16°坡行驶时，无论下坡还是上坡，速度一

般较慢,为了保证设备行走过程中的稳定性,应尽可能使设备的重心远离倾翻支点,通过计算分析,设备实际的重心位置如图 9 所示,离倾翻支点的距离满足使用要求。

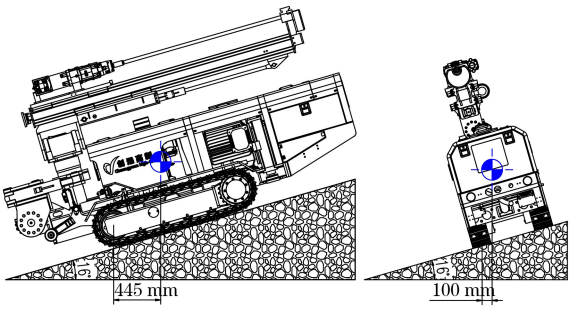


图 9 16°坡行驶稳定性分析

Fig.9 Stability analysis of driving on a 16° slope

(2) 作业稳定性分析。

在采场中,当前后支腿伸出触地机身调平后,通过自由度 F3 进行立机,当推进器往前摆正达到最大前摆位置后,设备在纵向上对稳定性要求最高,当自由度 F1 左右侧向摆动 90°时,设备在横向上对稳定性要求最高。通过计算分析,设备实际的重心位置如图 10 所示,离倾翻支点的距离满足使用要求。

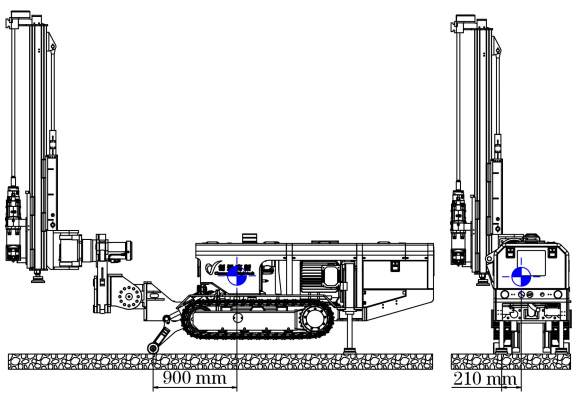


图 10 最大前摆及侧摆作业稳定性分析

Fig.10 Stability analysis of maximum front swing and side swing operations

2.2 原地转向驱动系统计算

本文通过采用履带底盘静液压行驶驱动系统实现原地转向功能,从而极大提升设备在狭小采场或小断面巷道转场移机时的适应性。

履带底盘原地转向过程如图 11 所示。履带接地长度 L,轨距 B,履带板宽 b。当一条履带正转,另外一条履带等速反转时,便实现了原地转向。

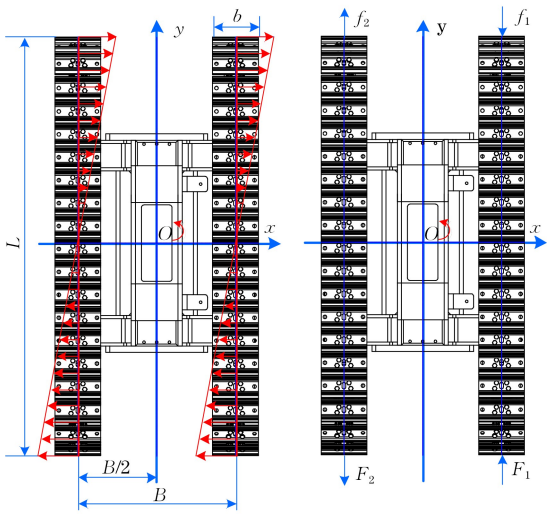


图 11 履带底盘原地转向示意

Fig.11 Schematic of track chassis turning in place

(1) 原地转向阻力矩[19]

由于履带底盘原地转向运动较复杂,为简化分析,本文设计时不考虑转向过程中的离心力、侧向刮土阻力和履带的内阻力。转向阻力矩为履带板上所有与地面接触点的摩擦力 f 对底盘转向中心 O 产生的阻碍底盘转向的作用力矩的总和。

原地转向过程产生转向阻力的地面对履带板作用力分布如图 11 所示。设履带底盘接地比压为 p_0,转向阻力沿 y 向积分得到转向阻力矩 M_R,采用下式进行计算。

$$p_0 = G/2bL \tag{1}$$

$$M_R = 2M_0 = 2\int_{-b/2}^{b/2} \mathrm{d}x_1 \int_{-L/2}^{L/2} \mu p_0 \frac{y_1}{L/2} y_1 \mathrm{d}y_1 = \mu GL/6 \tag{2}$$

式中:M_R 为转向阻力矩,N·m;μ 为履带与地面的阻力系数;G 为设备质量,N;L 为履带接地长度,m;M_0 为单个履带转向的阻力矩,N·m;x_1、y_1 为转向阻力沿 x、y 方向的积分。

将行驶系统设计参数(见表 2)数值代入式(2),计算可得 $M_R = 5\ 760$ N·m。

要实现原地转向,牵引力矩 M_T 须大于转向阻力矩 M_R,原地转向时,两条履带的牵引力大小相等方向相反,设为 F,则 $F_1 = F_2 = F$。

本文行驶系统采用静液压驱动,整机最大牵引力矩 M_T 计算过程如下。

液压马达最大额定输出扭矩 M_m:

$$M_m = Pq\eta_m / 2\pi \tag{3}$$

驱动轮的最大输出扭矩 M_q：

$$M_q = M_m i \eta_r \tag{4}$$

一条履带的最大牵引力 F：

$$F = M_q \eta_c / r \tag{5}$$

整机最大牵引力矩 M_T：

$$M_T = FB \tag{6}$$

将表2数值代入式(3)至式(6)，计算可得 M_T = 7 361.3 N·m。

由上述计算可知，整机最大牵引力矩 M_T 大于转向阻力矩 M_R，满足设备原地转向的要求。

表2　行驶系统设计参数

Table 2　Design parameters of hydraulic manipulator

质量 G/N	马达排量 q/(mL/r)	马达额定工作压力 P/MPa	驱动链轮基圆半径 r/mm	轨距 B/mm	履带接地长度 L/m	履带板宽 b/mm	马达减速机速比 i	马达机械效率 η_m	减速机机械效率 η_r	驱动链轮机械效率 η_c	履带阻力系数 μ
36 000	18	21	166.5	620	1.2	180	45.2	0.95	0.91	0.85	0.8

2.3　液压系统设计

微型凿岩台车液压系统主要由回转液压回路、推进冲击液压回路和行走辅助液压回路3部分组成，如图12所示。其中，回转液压回路、推进冲击液压回路用于作业过程中钎杆的旋进、推进和冲击，实现安全高效凿岩；行走辅助液压回路用于转场移机、整机调平和钻臂姿态的调整，实现炮孔定位，如图13所示。

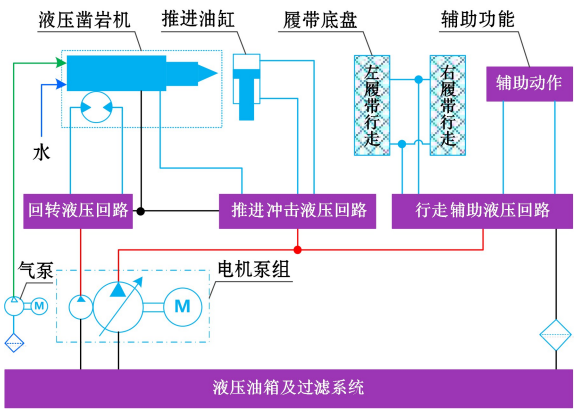
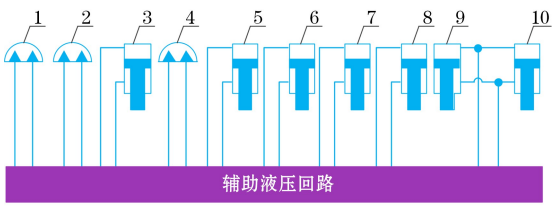


图12　微型凿岩台车液压系统回路

Fig.12　Hydraulic system circuit of micro rock drilling rig



1—180° 摆动油缸　2—360° 摆动油缸
3—平移油缸　4—180° 摆动油缸
5—补偿油缸　6—顶撑油缸
7—左前支腿油缸　8—右前支腿油缸
9—左后支腿油缸　10—右后支腿油缸

图13　行走辅助液压回路

Fig.13　Auxiliary hydraulic circuit

3　微型凿岩台车测试及应用

3.1　微型凿岩台车厂内测试

根据急倾斜薄矿脉机械化开采的要求，在厂内搭建了模拟巷道和斜坡，进行了快慢速行驶、原地转向、爬坡、制动、推进力、巷道通过性及凿岩定位等模拟测试，测试结果见表3。由表3可知，微型凿岩台车的各项数据均符合设计标准，满足急倾斜薄矿脉的使用需求。

表3　微型凿岩台车性能测试结果对比

Table 3　Factory test record form

项目	支腿保压性能/mm	行走速度/(km/h)	推进力/kN	冲击压力/MPa	回转压力/MPa	静态制动力/kN	原地转向半径/m
技术要求	额定负载作用下活塞杆的移动量在6 h内≤4 mm	Ⅰ档：1.5±0.1 Ⅱ档：2.2±0.2	15±0.2	≤14.5	≤4	≥8.54	≤2
测试结果	2 mm	Ⅰ档：1.47 Ⅱ档：2.22	14.8	14.16	3.92	14.1	1.997

3.2　微型凿岩台车现场应用

考虑到转场运输的便捷性，设备整机采用模块化设计，结构紧凑，转场运输状态时的尺寸(长×宽×高)为：3 500 mm×800 mm×1 770 mm，可直接将设备移动至罐笼中整机下井，无需拆解和再组装。设备下井后选择位于−55 m中段的试验采场进行垂直平行孔及扇形孔凿岩测试，炮孔孔径42 mm，孔深1.5 m，通过视距遥控的方式控制凿岩作业，如图14所示。



(a)行走转场 (b)斜孔钻凿 (c)垂直孔钻凿

图 14 微型凿岩台车现场应用

Fig.14 On site application of micro rock drilling rig

通过现场的应用发现,微型凿岩台车可满足采场、巷道等狭小空间转场行驶、凿岩定位及作业的需求,在岩石普氏硬度系数 $f=10$ 时,单孔进尺速度最快可达 2.2 m/min,人工凿岩平均效率为 1.35 m/min,设备凿岩效率为 1.69 m/min,综合凿岩效率比人工凿岩效率提升 25%以上。同时,通过视距遥控实现了作业人员远离危险空区,降低了作业的安全风险,可满足急倾斜薄矿脉机械化开采的实际工程应用。采矿工艺优化前后的技术指标对比分析见表 4。

表 4 采矿工艺优化前后技术指标对比分析

Table 4 Comparative analysis of technical indicators before and after mining process optimization

结果对比	凿岩效率/(m/min)	凿岩方式	作业人数	采幅/m	安全风险
优化前	1.2~1.5	人工空区风动凿岩	≥2	≥1.8	高风险
优化后	2.2	视距遥控凿岩	1	1.2	低风险

4 结论

急倾斜薄矿脉浅孔留矿采矿法开采机械化程度较低,多为狭小空间内人工手持风动凿岩机进行凿岩作业,劳动强度大、安全风险高,本文通过研发新型微型凿岩台车和应用视距遥控技术解决凿岩工序的机械化实施难题。以国内某金属矿为工程背景,通过现场实际工程应用主要得出以下结论。

(1)提出了基于微型凿岩台车的急倾斜薄矿脉机械化开采工艺,理论分析了微型凿岩台车在急倾斜薄矿脉狭小空间转场行驶、定位及凿岩作业的可行性,结果表明,4 个自由度推进器总成结构可满足凿岩定位的要求,所设计静液压行驶系统满足复杂路况下原地转向的要求。

(2)通过快慢速行驶、原地转向、爬坡、制动、推进力、模拟巷道通过性及凿岩定位等模拟测试,初步验证了微型凿岩台车设计方案的可行性。从试验采场的现场工业应用效果中可以看出,微型凿岩台车单孔进尺速度最快可达 2.2 m/min,综合凿岩效率比人工凿岩提升 25%以上,同时,视距遥控微型凿岩台车的应用可有效减少作业人数、减小采幅、降低安全风险和提升综合开采效率,可为开采倾角>65°、脉厚<0.8 m 的急倾斜薄矿脉机械化改造提供方案参考。

参考文献(References):

[1] 钟春晖.极薄矿脉采矿方法研究[D].昆明:昆明理工大学,2004.
ZHONG Chunhui. Research on mining methods for extremely thin mineral veins[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2004.

[2] 温清尧,秦京波.急倾斜薄矿脉采矿方法研究[J].世界有色金属,2023(10):35-37.
WEN Qingyao, QIN Jingbo. Study on mining method of steeply inclined thin vein[J]. World Nonferrous Metals, 2023(10):35-37.

[3] 王江.急倾斜薄矿体开采方法与安全技术研究[D].长沙:中南大学,2013.
WANG Jiang. Study on the mining and safety technology of the extremely steep thin ore body[D]. Changsha: Central South University,2013.

[4] 廖九波,范文录.急倾斜极薄矿脉机械化开采新技术及应用[J].矿业研究与开发,2019,39(7):10-14.
LIAO Jiubo, FAN Wenlu. A new machined mining technology of steeply inclined and extremely thin ore vein and its application[J]. Mining Research and Development, 2019,39(7):10-14.

[5] 郑剑洪.板溪锑矿急倾斜极薄矿脉低贫损高效采矿技术研究[D].湘潭：湖南科技大学，2011.
ZHENG Jianhong. Study of mining technology on thin low loss and high efficiency for steep extra-narrow veins in Banxi antimony ore[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2011.

[6] 戚伟.高海拔急倾斜薄矿体精细开采关键技术研究与应用[D].北京：北京科技大学，2021.
QI Wei. Research and application of key technology for finemining of steep thin orebody in high altitude area[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.

[7] 张建波.平底式底部结构浅孔留矿法在某铅锌矿的应用[J].甘肃冶金，2020，42(1)：1-3.
ZHANG Jianbo. Application of shallow hole shrinkage method with flat bottom structure in a lead zinc mine[J]. Gansu Metallurgy, 2020, 42(1): 1-3.

[8] 万相宗.浅孔留矿法在小团山铜矿的应用[J].现代矿业，2020，36(5)：88-90.
WAN Xiangzong. Application of short-hole shrinkage method in Xiaotuanshan Copper Mine[J]. Modern Mining, 2020, 36(5): 88-90.

[9] 丁明飞.机械化浅孔留矿嗣后充填法在望儿山薄矿体的应用[J].中国矿山工程，2016，45(6)：41-43＋56.
DING Mingfei. Application of mechanized shallow hole shrinkage and subsequence filling in thin orebody mining of Wangershan Mining Area[J]. China Mine Engineering, 2016, 45(6): 41-43＋56.

[10] 姚泽春，杨红军，刘盛，等.急倾斜薄矿脉机械化采矿方案优选及应用[J].现代矿业，2023，39(6)：129-132.
YAO Zechun, YANG Hongjun, LIU Sheng, et al. Optimization and application of mechanized mining scheme for steeply inclined thin vein[J]. Modern Mining, 2023, 39(6): 129-132.

[11] 刘强，赵刚，李浩.红透山铜锌矿成套机械化开采方案研究[J].有色矿冶，2023，39(6)：10-13＋43.
LIU Qiang, ZHAO Gang, LI Hao. Research on the complete mechanized mining plan of Hongtoushan Copper Zinc Mine[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2023, 39(6): 10-13＋43.

[12] 杨建国，陈俊宇，周兴晖，等.断裂构造带内急倾斜薄矿脉安全高效充填采矿方法研究[J].黄金，2023，44(11)：5-11.
YANG Jianguo, CHEN Junyu, ZHOU Xinghui, et al. Safe and efficient backfill mining method of steeply inclined thin ore veins in faulted structural zone[J]. Gold, 2023, 44(11): 5-11.

[13] 杨忠炯，何正忠.薄窄矿脉矿山采掘机械化问题[J].矿山机械，1994(6)：7-11.
YANG Zhongjiong, HE Zhengzhong. Mechanization of mining in thin and narrow vein mines[J]. MIning & Processing Equipment, 1994(6): 7-11.

[14] 胡际平.窄矿脉机械化开采的问题和设备综述[J].金属矿山，1992(12)：54-58.
HU Jiping. Overview of problems and equipment in mechanized mining of narrow veins[J]. Metal Mine, 1992(12): 54-58.

[15] 于耀国.薄矿脉采矿机械化[J].国外金属矿山，1992(5)：46-50.
YU Yaoguo. Mechanization of thin ore vein mining[J]. Foreign Metal Mines, 1992(5): 46-50.

[16] 颜武刚，王锋，代建龙，等.一种小型钻机：202310931009.3[P].2023-08-25.

[17] 王锋，代建龙，颜武刚，等.一种模块化小型钻机：ZL202322002673.8[P].2024-04-09.

[18] 熊有为，朱建国，刘福春，等.基于离散元方法的急倾斜极薄矿脉机械化开采爆破参数仿真优化[J].有色金属(矿山部分)，2024，76(3)：32-38.
XIONG Youwei, ZHU Jianguo, LIU Fuchun, et al. Simulation and optimization of blasting parameters for mechanized mining of steeply inclined thin veins based on discrete element method[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024, 76(3): 32-38.

[19] 王殿龙，周君，徐金帅.简化地面条件下履带起重机原地转向研究[J].中国工程机械学报，2009，7(4)：407-411.
WANG Dianlong, ZHOU Jun, XU Jinshuai. Investigation into in-situ steering for crawler cranes under simplified ground[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2009, 7(4): 407-411.