

大直径气动反循环潜孔锤国内外研究进展及关键技术

李永华, 吴浩, 马文其

中国煤炭地质总局第二勘探局, 河北 涿州

收稿日期: 2022年12月25日; 录用日期: 2023年1月24日; 发布日期: 2023年1月31日

摘要

介绍了国内外大直径气动反循环潜孔锤的研究进展, 阐述了反循环潜孔锤高效碎岩、充分排渣和快速钻进关键技术及研发技术路线, 展望了该钻具的应用前景。

关键词

大直径气动反循环潜孔锤, 研究进展, 关键技术

Research Progress and Key Technology of Large Diameter Pneumatic Reverse Circulation DTH Hammer at Home and Abroad

Yonghua Li, Hao Wu, Wenqi Ma

The Second Exploration Bureau of China Coal Geology Administration, Zhuozhou Hebei

Received: Dec. 25th, 2022; accepted: Jan. 24th, 2023; published: Jan. 31st, 2023

Abstract

This paper introduces the research progress of large diameter pneumatic reverse circulation DTH hammer at home and abroad, the key technologies and R&D technology route of reverse circulation DTH hammer for efficient rock crushing, full slag removal and fast drilling are described, and looks forward to its application prospects.

Keywords

Large Diameter Pneumatic Reverse Circulation DTH Hammer, Research Progress, Key Technology

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 气动反循环潜孔锤概述

气动潜孔锤钻进具有钻井效率高、钻头寿命长、钻井质量好的特点，是一种高效钻井手段。

气动潜孔锤按循环方式分为正循环潜孔锤(图 1)和反循环潜孔锤(图 2)，正循环潜孔锤钻进是压缩空气从钻杆内进入潜孔锤，驱动潜孔锤活塞冲击钻头和岩石，破碎后的岩屑从钻杆与孔壁之间的环状间隙上返。反循环潜孔锤钻进是压缩空气通过双壁钻杆进入潜孔锤，破碎的岩屑从潜孔锤内部及双壁钻杆的内管中心通道上返排出(图 3)。气动反循环潜孔锤按潜孔锤数量分为单体式和集束式(捆绑式)两种型式。钻头直径 ≥ 400 mm 的潜孔锤为大直径潜孔锤。

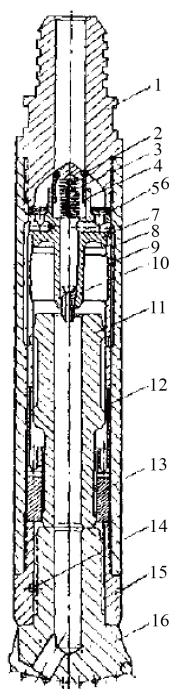


Figure 1. Positive circulation DTH hammer

图 1. 正循环潜孔锤

气动反循环潜孔锤钻进具有钻进效率高、易于穿过采空区等复杂地层、耗气量少等突出优点，已广泛地应用在地质勘探与开发、基础工程施工、水文水井钻凿等工程领域，解决了生产实践中遇到的各类钻探难题，并带来了较好的社会效益。在大口径工程孔、生命救援孔钻进等领域具有良好应用前景 [1] [2]。

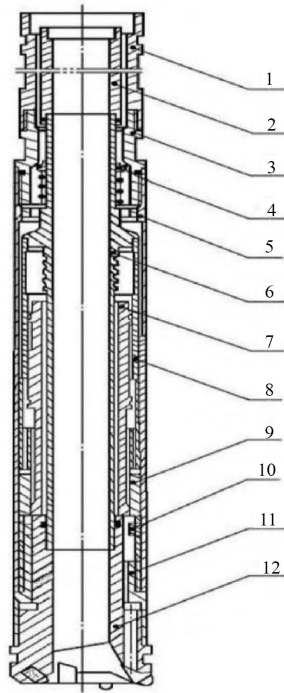


Figure 2. Reverse circulation DTH hammer
图 2. 反循环潜孔锤

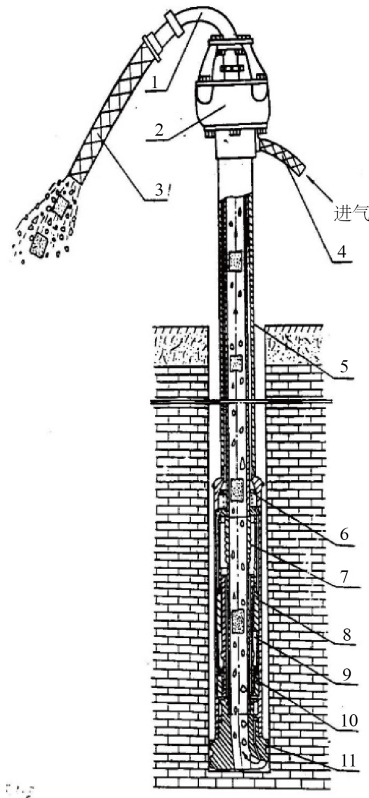


Figure 3. Schematic diagram of reverse circulation DTH hammer drill
图 3. 反循环潜孔锤钻进示意图

2. 国内研究进展

国内研制大直径反循环潜孔锤主要有以下几种：吉林大学研制的 $\Phi 445$ mm、 $\Phi 660$ mm 大直径贯通式反循环潜孔锤，中煤科工集团西安研究院研制的 $\Phi 660$ mm 集束式反循环潜孔锤以及 $\Phi 710/311$ mm 扩孔集束式反循环潜孔锤，详见表 1 [3] [4] [5]。

Table 1. Application of large diameter reverse circulation DTH hammer in China

表 1. 国内大直径反循环潜孔锤应用情况

产品类型	产品型号或规格	配套专用钻具	研制单位	主要应用情况
单体式反循环潜孔锤	$\Phi 445$ mm、 $\Phi 660$ mm 贯通式潜孔锤	双壁钻杆	吉林大学与广汉石油钻采研究院联合研制	$\Phi 660$ mm 贯通式潜孔锤在某工地进行了现场试验，试验深度 50.3 m，最高机械钻速可达 6 m/h，平均机械钻 4.5 m/h。
	$\Phi 660$ mm 单体式反循环潜孔锤	双壁钻杆	英国 Bulroc	在某煤矿水井施工中，钻井深度 148 m，机械钻速可达 6~7 m/h。
集束式反循环潜孔锤	$\Phi 660$ mm 集束式反循环潜孔锤	双壁钻杆	陕西煤田地质局	曾进行过室内试验，钻进深度 10 多米；还未进行野外试验。
	$\Phi 710/311$ mm 扩孔集束式反循环潜孔锤	双壁钻杆	中煤科工集团西安研究院	试验孔段 32~83 m，最高机械钻速 4 m/h，平均机械钻速 2.1 m/h。
	$\Phi 580/311$ mm 扩孔集束式反循环潜孔锤	双壁钻杆	中煤科工集团西安研究院	注气量 $35 \text{ m}^3/\text{min}$ ，转速 35 r/min，注气压力 1.1~1.2 MPa，钻进深度 284 m。

2.1. GQ 系列单体大直径气动反循环潜孔锤

吉林学历经多年、研发成功了 GQ 系列贯通式单体气动反循环潜孔锤(表 2)，在复杂地层钻进时能够有效解决井壁破碎、坍塌、漏失等问题，并可同步完成钻进、取芯、洗井等工艺，降低了钻井成本，近年来研发成功 SGQ400 型大直径单体气动反循环潜孔锤，2021 年在山西省成功开展了野外钻进试验，采用 TSJ2600 水源钻机，配套 2 台空压机、 $\Phi 219/127$ mm 双壁钻杆，反循环气水龙头等设备，钻进深度约 50 米(图 4)。



Figure 4. Field test of SGQ400 reverse circulation DTH hammer

图 4. SGQ400 型反循环潜孔锤野外试验

Table 2. Main technical parameters of GQ series single pneumatic reverse circulation DTH hammer
表 2. GQ 系列单体气动反循环潜孔锤主要技术参数

技术参数规格	GQ-200	GQ-250	SGQ-320	SGQ-400
潜孔锤外径(mm)	190	242	320	400
贯通孔直径(mm)	62	60	89	
钻孔直径(mm)	200~250	250~350	330~600	600(伸缩钻头)
潜孔锤长度(mm)	1468	1459	1549	
单次冲击功(J)	720	1052	2000	2500
冲击频率(Hz)	18	16	15	21
耗气量(m ³ /min)	14	17	20	92.2
潜孔锤压力降(MPa)	1.0	1.05	1.0	1.8
活塞质量(kg)	23	34	72.5	250

2.2. 集束式气动反循环潜孔锤

中煤科工集团西安研究院研制的 $\Phi 580/311$ mm 集束式扩孔反循环潜孔锤(图 5)由 3 个常规正循环潜孔锤在同一圆周面上均布捆绑组合而成, 由上至下分别是双壁接头、配气室、导气管、中心管、常规正循环潜孔锤、排渣管、底部密封盘以及导向头等。其中, 双壁接头与 $\Phi 178$ mm/114 mm 大规格双壁钻杆螺纹连接; 配气室将压缩空气通过导气管注入常规正循环潜孔锤, 使其高效破碎岩石; 排渣管是孔底产生的岩粉(屑)、废气以及水的排出通道, 它与双壁钻杆内管中心通道相通; 底部密封盘主要是将孔底大颗粒岩粉(屑)与钻孔环空两者进行有效封隔, 其侧部表面设置的耐磨带可修正孔壁起保径作用; 导向头下部可连接 $\Phi 311$ mm 钻头, 防止扩孔中偏离钻孔原轨迹。

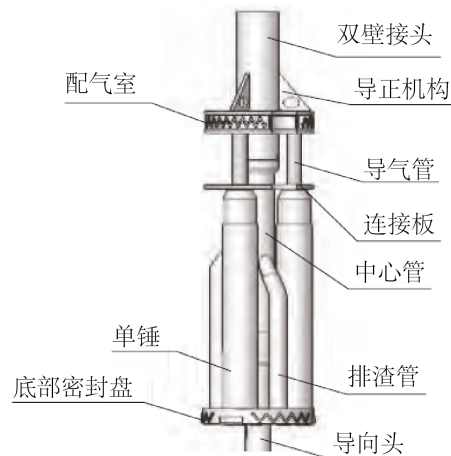


Figure 5. $\Phi 580/311$ mm cluster reaming reverse circulation down the hole hammer

图 5. $\Phi 580/311$ mm 集束式扩孔反循环潜孔锤

现场应用效果: 钻遇地层主要为泥岩、砂质泥岩、细粒砂岩和粉砂岩, 注气量 35 m³/min、转速 35 r/min、注气压力 1.1~1.2 MPa, 钻进深度 284 m。反循环钻进排渣效果好, 钻进效率高, 平均机械钻速 3.41 m/h。与同条件下牙轮扩孔钻头平均机械钻速 0.8 m/h 相比, 效率提高了 3.2 倍。

3. 国外研究进展

20 世纪 80 年代以来, 潜孔锤反循环钻头在国内外得到了飞快的发展, 相关的公司与科研单位均进行了结构改良设计的研究工作, 出现了多种多样的反循环钻头结构类型并进行了测试与野外试验研究工作, 介绍如下[6][7]。

3.1. 美国 Numa 公司

Numa 公司主要生产用于油气井和矿山勘探的潜孔锤, 尤其在大直径反循环钻头设计方面有独到的技术。该公司已先后研发了 PRC 和 RC 系列规格的反循环潜孔锤, 其中反循环潜孔锤钻头最大直径能达到 $\Phi 916$ mm。钻头体花键处采用了起到引流作用的喷射凹槽结构, 此外, 钻头底部的吸渣孔位置设有多个底喷孔(图 6)。

在宾夕法尼亚州东南部, 美国 Numa 公司采用潜孔锤和聚晶金刚石(PCD)硬质合金钻头成功完成了 1 个大直径深孔, 钻探深度达到 1188 m。该项目采用 5 台空气压缩机和 5 台两级增压器串联运行输送空气量 6.136 m³/s。气流监测器显示, 进入钻孔的实际风量在 $4.72\sim 4.96$ m³/s。钻井压力 $4.0\sim 4.3$ MPa。该项目采用分级钻孔工艺, 钻孔直径从 $\Phi 991$ mm 减小到 $\Phi 610$ mm。一开采用 RC300 潜孔锤 + $\Phi 991$ mm 钻头钻进 24.4 m, 二开采用 RC300 潜孔锤 + $\Phi 864$ mm 钻头钻进至 230 m, 三开采用正循环潜孔锤终孔。

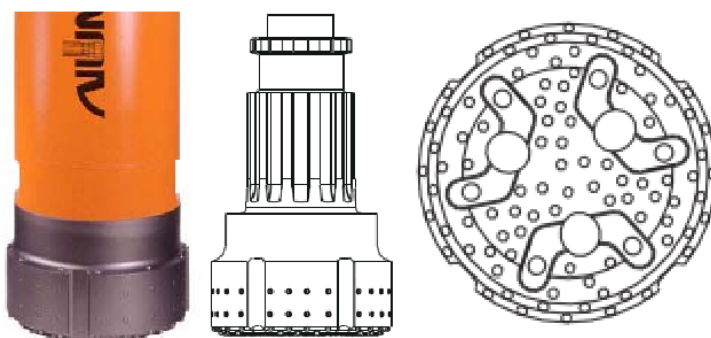


Figure 6. RC300 large diameter pneumatic reverse circulation drilling tool
图 6. RC300 大直径气动反循环钻具

3.2. 瑞典 Atlas Copco 公司

该公司主要生产 Secoroc 和 Terranox 系列的气动反循环潜孔锤及配套的反循环钻头。反循环潜孔锤钻头采用外部喷射式结构, 由于喷射孔小而密集, 形成了外部环状喷射结构(图 7)。



Figure 7. Secoroc series pneumatic reverse circulation DTH hammer drilling tools
图 7. Secoroc 系列气动反循环潜孔锤钻具

3.3. 韩国东宇公司

为解决工程中大孔径钻探时潜孔锤间歇式冲击所形成的单次能量不足而导致的机械钻速低、钻进成本高、施工周期长等问题,韩国东宇公司研发应用了集束式气动反循环潜孔锤(图 8),可有效地解决嵌岩桩孔及硬地层的钻进难题,并在工程实际应用中取得了理想效果,适用孔径范围 610 mm 至 1980 mm。



Figure 8. Cluster pneumatic reverse circulation DTH hammer
图 8. 集束式气动反循环潜孔锤

综上所述,目前国内研发的大直径气动反循环潜孔锤品种较少,钻进深度不深,一般不超于 300 m,而国外研发的大直径气动反循环潜孔锤钻具品种繁多,结构多样,应用广泛。在 600 m 深度大直径生命救援孔气动反循环潜孔钻具研制方面,我国需要加强研发攻关。

4. 关键技术

大直径气动反循环潜孔锤关键技术主要包括三个方面,分别是高效碎岩、充分排渣和快速钻进[8] [9]。

4.1. 高效碎岩

提高碎岩效率是提高钻进效率的主要途径之一,大直径潜孔锤碎岩机理和小直径潜孔锤碎岩机理不同,其存在碎岩不均匀性、岩石抗压强度、岩石抗剪强度、锤头结构形状、球齿结构等因素。项目基于岩石力学、弹性力学和损伤断裂力学知识,建立球齿动静加载下碎岩模型和大直径气动潜孔锤碎岩模型,研究荷载形式与量值对岩石损伤断裂的影响,总结岩石破碎规律,利用有限元分析软件仿真结果与试验结果进行对比分析,指导潜孔锤钻具结构、布齿方案设计,形成硬岩地层大直径气动潜孔锤扩孔碎岩技术。

4.2. 充分排渣

大深度气动反循环排渣的建立是基于内外循环压力差的基础上,其排渣能力与气流速度(流量)紧密相关,只有达到一定的压力差和流量才能保证排渣的顺利进行。而大深度的循环过程中通道长,变径多,存在的泄露之处使得局部或者全程达不到排渣要求。鉴于此,基于流固耦合理论和两相流理论,建立起大深度气动反循环排渣的仿真模型和数学模型,考虑气体压缩性、岩屑大小等因素,通过开展全尺寸携岩仿真研究,优化循环通道、结构参数,以及气动参数,形成大深度大直径生命救援孔气动反循环排渣

技术。

4.3. 快速钻进

大直径气动反循环潜孔锤钻进效率的高低, 不仅取决于所用的空气压缩机、冲击器及钻头的性能和质量, 而且必须做到合理操作, 正确选用钻进技术参数。潜孔锤钻进的主要技术参数应包括钻压、转速和风压及风量。

钻压是保证冲击功充分发挥作用的辅助力, 因此过大和过小都会影响潜孔锤钻进的正常进行, 大则会引起钻头的过早磨损, 球齿掉落, 回转困难; 过小则影响冲击功的有效传递, 根据钻进实践, 气动潜孔锤钻进合理的钻压取值是以单位钻头底唇面积的力表示, 为 0.4~0.7 MPa, 中硬地层取上限值, 硬地层取下限值。

合理的回转速度应保证在最优的冲击间隔内破碎岩石, 根据钻进实践经验, 气动潜孔锤钻进合理的转速值为: 软岩石 30~50 r/min; 中硬岩石 20~40 r/min; 硬岩石 10~30 r/min。

气动反循环潜孔锤钻进的上返风速必须大于岩屑的悬浮速度:

$$Q \geq 60v \frac{\pi}{4} d^2 K \quad (1)$$

式(1):

Q ——空气压缩机排量, m^3/s ;

v ——等效上返风速, m/s ;

D ——双壁钻杆中心孔内径, m ;

K ——修正系数。

在确定系数值 K 时, 一般孔深在 100~200 m 时, $K = 1.05 \sim 1.1$; 孔深在 500 m 时, $K = 1.25 \sim 1.3$ 。

一般上返速度在取芯钻进时 10~15 m/s ; 无岩芯钻进时 20~25 m/s 。

空压机风压计算, 在干孔(无水孔)中, 压风机应具有的压力, 近似确定为:

$$P_{\text{冲}} = qL + P_M + P_{\text{锤}} \quad (2)$$

式(2):

$P_{\text{冲}}$ ——压风机风压, MPa ;

q ——每米干孔长度的压力值, 考虑克服气、水、岩粉混合液柱压力, 一般为 0.0015 MPa/m ;

L ——钻杆柱长度, m ;

P_M ——岩心管和各支管上的压力损失, 一般 $P_M = 0.1 \sim 0.3 \text{ MPa}$;

$P_{\text{锤}}$ ——潜孔锤中压力降, MPa 。

大直径气动反循环潜孔锤研发技术路线如下:

1) 针对高效碎岩关键技术, 建立冲击部件力学模型、锤头碎岩模型, 进行高效碎岩机理分析、进行潜孔锤、潜孔锤钻头和布齿设计。

2) 针对充分排渣关键技术, 建立气体循环排渣模型、密封结构模型并进行双壁钻具优选。分析循环通道压力降和流量, 优化设计潜孔锤中心通道。

3) 针对快速钻进关键技术, 进行不同地层岩性分析, 优化钻压、转速、空气量等钻进规程参数, 设计选配合适的钻机、空压机等地面设备。

4) 在此基础上, 进行大直径气动反循环潜孔锤样机制造、开展反循环潜孔锤测试、反循环潜孔锤野外试验, 总结提炼出大直径气动反循环潜孔锤钻进技术与装备体系。技术路线图详见图 9。

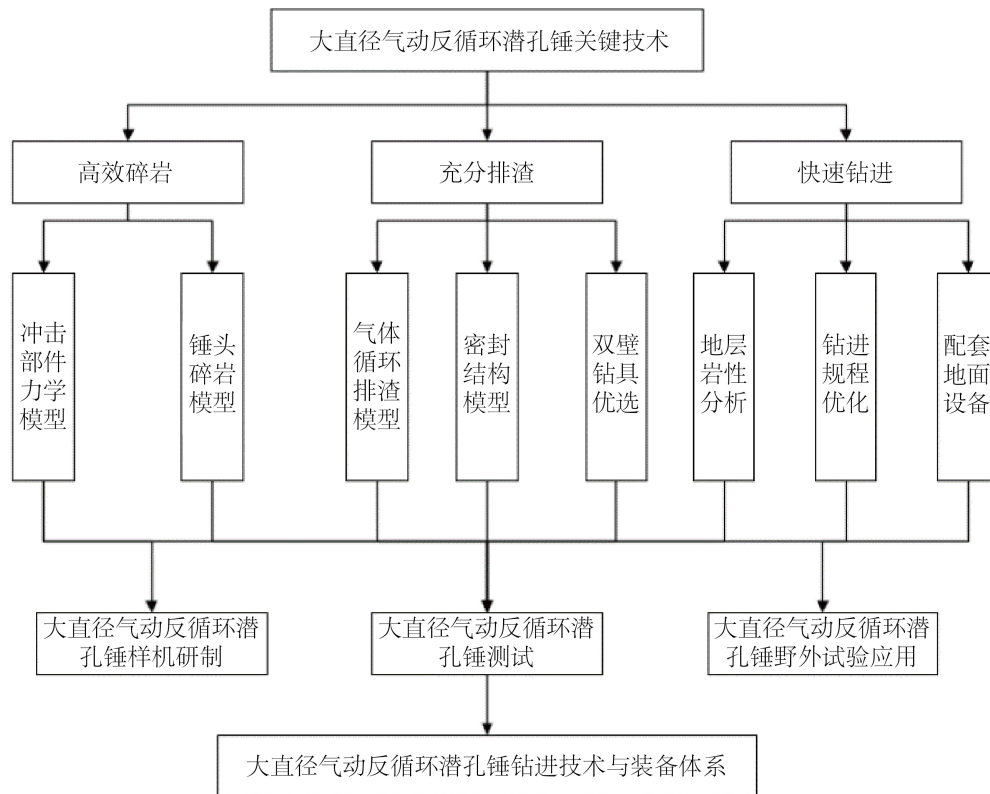


Figure 9. Technical roadmap

图 9. 技术路线图

5. 展望

大直径气动反循环潜孔锤钻具是矿山灾害应急救援关键急需装备，还能够用于施工煤矿排水孔、通风孔、电缆孔以及特大滑坡灾害防治，具有良好的市场推广价值。科研与工程技术人员应在大直径气动反循环潜孔锤钻具高效碎岩、充分排渣和快速钻进等关键技术方面加强研究攻关。

参考文献

- [1] 张堃, 渠伟, 李新年, 张二兵. 大口径救援生命通道建造技术在救援中的应用与探讨[C]//中国职业安全健康协会 2016 年学术年会论文集(下册). 2016: 511-517.
- [2] 易振华, 何龙飞, 胡志海. 大直径贯通式潜孔锤局部气举反循环钻进工艺的试验研究[J]. 岩土工程技术, 2013, 27(1): 5-8.
- [3] 郝世俊, 张晶. 大直径救援井高效钻井技术及装备现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 75-81.
- [4] 甘心, 殷琨, 何将福, 殷其雷. 救援井用大直径贯通式潜孔锤及钻头的研制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(6): 1844-1851.
- [5] 赵江鹏, 刘建林, 赵建国. 矿山大口径钻孔循环钻进技术研究[J]. 金属矿山, 2018(1): 147-151.
- [6] <https://www.numahammers.com/>.
- [7] <https://www.atlascopco.com/>.
- [8] 石永泉. 潜孔锤钻进技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2013.
- [9] 田宏亮, 张阳, 郝世俊, 等. 矿山灾害应急救援通道快速安全构建技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5): 29-33.