大口径集束式反循环潜孔锤扩孔钻头研制与应用

曹继玉[1]，杨　升[1]，齐新刚[2]，屈立鑫[1]
（1.陕西太合智能钻探有限公司，陕西 西安 710086；2.陕西省一三九煤田地质水文地质有限公司，陕西 渭南 714000）

摘要：在硬岩矿山大口径瓦斯排放孔、通风孔、救援孔等钻孔施工中，常规正循环扩孔钻进技术破岩困难且排渣能力差，致使钻进效率低。研发大口径集束式反循环潜孔锤扩孔钻头，解决大口径硬岩扩孔破岩低效、受力不均、排渣难、钻头寿命短等技术难题。通过集束式扩孔钻头结构模块化设计、潜孔锤破岩力学计算、ANSYS静动力学仿真，设计加工大口径集束式反循环潜孔锤扩孔钻头，应用于铜川华能煤矿大口径投料孔扩孔钻进施工，钻进效率提升26%、钻头寿命提升20%、最大排渣粒径40 mm，为同类矿山大口径钻孔提供高效可行的扩孔钻进技术。

关键词：大口径钻孔；集束式反循环潜孔锤；扩孔钻头；扩孔钻进；硬岩钻进；煤矿大口径投料孔
中图分类号：P634.4;TD7　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9686(2026)06-0147-07

Development and application of large-diameter cluster-type reverse-circulation DTH hammer reaming bit

CAO Jiyu[1], YANG Sheng[1], QI Xingang[2], QU Lixin[1]
(1. *Shaanxi Taihe Intelligent Drilling Co., Ltd., Xi'an Shaanxi* 710086, *China*; 2. *Shaanxi No.*139 *Coalfield Geology and Hydrogeology Co., Ltd., Weinan Shaanxi* 714000, *China*)

Abstract: During the construction of large-diameter gas drainage holes, ventilation holes and rescue holes in hard-rock mines, conventional reaming technology with forward circulation suffers difficult rock breaking and poor cuttings removal capacity, resulting in low drilling efficiency. A large-diameter cluster-type reverse-circulation DTH hammer reaming bit is developed to tackle technical bottlenecks including low rock-breaking efficiency, uneven stress distribution, difficult cuttings discharge and short bit service life in large-diameter hard-rock reaming. Through modular structural design of the clustered reaming bit, mechanical calculation for rock breaking of the DTH hammer, and static and dynamic simulation via ANSYS, the large-diameter cluster-type reverse-circulation DTH hammer reaming bit is designed and manufactured. It has been applied to reaming operations of large-diameter feeding holes in Huaneng Coal Mine in Tongchuan. The drilling efficiency is increased by 26%, the bit service life is improved by 20%, and the maximum cuttings particle size reaches 40 mm. This research provides feasible high-efficiency reaming technology for similar large-diameter boreholes in mines.

Key words: large-diameter borehole; cluster-type reverse-circulation DTH hammer; reaming bit; reaming drilling; hard-rock drilling; large-diameter feeding hole in coal mine

0　引言

随着矿山深部开采与综合利用，矿山基岩大口径排水孔、送料孔、瓦斯排放孔、综合利用孔、救援孔等大口径硬岩钻孔、反井扩孔、深孔成井工程需求持续增长，施工地层日趋复杂，涵盖坚硬基岩、破碎断层、软硬互层及富水松散地层等，对设备的钻进效率、成孔质量、排渣稳定性及地层适应性提出了更高要求。传统大口径钻孔施工多采用牙轮钻头、滚刀扩孔钻头等，虽工艺成熟，但在硬岩中破岩效率极低、刀具磨损严重，且孔底排渣不彻底问题

收稿日期：2025-11-29；**修回日期**：2026-08-26　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.06.016
第一作者：曹继玉，男，汉族，1974年生，工程师，探矿工程专业，主要从事多工艺空气钻进研究及大口径集束式潜孔锤钻头研发工作，陕西省西咸新区沣东新城丰全路1号，dmgy040919@126.com。
引用格式：曹继玉，杨升，齐新刚，等.大口径集束式反循环潜孔锤扩孔钻头研制与应用[J].钻探工程，2026，53(6)：147-153.
CAO Jiyu, YANG Sheng, QI Xingang, et al. Development and application of large-diameter cluster-type reverse-circulation DTH hammer reaming bit[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(6): 147-153.

突出，极易引发卡钻、塌孔、孔壁失稳等施工故障，大幅延长施工周期、增加工程成本，难以适配深部、大孔径、复杂地层的高效施工需求[1-2]。

集束式潜孔锤凭借多冲击器协同冲击破岩的优势，在大口径扩孔施工中逐步替代传统钻头，结合反循环排渣有效改善孔底排渣效果，大幅提升硬岩钻进效率。但现有常规集束式反循环潜孔锤扩孔技术仍存在诸多技术短板：多数设备排渣通道结构设计不合理，气路与渣道布局耦合性差，有效排渣面积不足，高压气流携渣能力有限，大颗粒岩屑难以快速排出，连续钻进过程中易出现孔底积渣堵塞、反循环流场失稳的问题，制约持续高效施工；常规集束式钻头多组冲击器同步性差、受力不均，在软硬不均地层钻进时易产生偏载振动，造成钻孔偏斜、孔壁规整度差，同时加剧钻头冲击组件磨损，设备使用寿命短、故障率高；现有钻头整体结构集成度低、定位导向性能薄弱，破碎带、松散地层施工时防卡钻、防塌能力不足，在复杂恶劣地层施工时孔壁稳定性较差；此外，部分配套钻具与钻头匹配性不足，气路压力损耗大、能量利用率低，难以形成整体施工能效的最优化[3-4]。

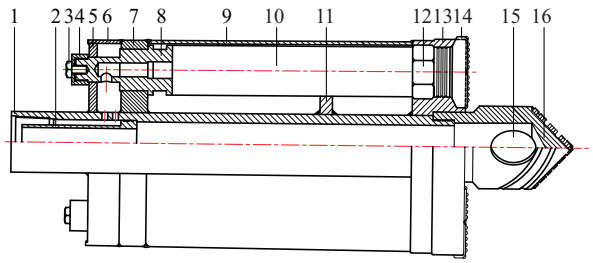
现有国内外研究多集中于常规集束式潜孔锤的结构优化、单冲击器参数调试及简单地层适配试验，针对大口径工况下反循环流场协同调控、集束冲击同步匹配、一体化防堵防卡结构的系统性优化研究较为匮乏，尚未形成适配复杂硬岩、富水破碎地层的专用大口径集束式反循环扩孔钻头技术体系，存在结构集成设计不完善、流场排渣机理不清晰、多冲击协同破岩机制不明确等问题，导致现有设备普遍存在稳定性差、能效低、地层适配性单一等，无法满足规模化、高效化、高稳定性的大口径扩孔工程施工需求[5]。

基于此，本文依托铜川华能煤矿XC01大口径投料孔工程，针对复杂地层大口径硬岩扩孔工程实际痛点，设计一款大口径集束式反循环潜孔锤扩孔钻头，优化集束冲击布局、反循环排渣通道及整体防护结构，探究多冲击器协同破岩机理与高效反循环排渣规律，解决传统设备排渣不畅、钻进偏斜、故障率高、地层适配性差等技术难题，为复杂地层大口径深孔扩孔高效施工提供新型装备支撑与技术参考。

1 钻头总体结构与工作原理

1.1 钻头结构设计

Ø600 mm集束式反循环气动潜孔锤扩孔钻头结构如图1所示，其中，中心管1、内管2组成环状间隙，为钻头气室供气，气室盖板5、围筒6、高频后座7与中心管1的外壁组成钻头的空气室，中心管1、气室盖板5、高频后座7、中间固定板11、底唇板13及钻头体围筒9组成钻头的集束体。冲击器后接头8、前接头12、冲击器10及锤头14组成潜孔子锤，安装在集束体上，由固定螺母4和止退螺栓3固定连接，方便拆卸维修。



1—中心管；2—内管；3—止退螺栓；4—固定螺母；5—气室盖板；6—气室围筒；7—高频后座；8—冲击器后接头；9—钻头体围筒；10—冲击器；11—中间固定板；12—冲击器前接头；13—底唇板；14—锤头；15—吸渣口；16—前引导钻头

图1 集束式反循环气动潜孔锤扩孔钻头结构

Fig.1 Structure of cluster-type reverse-circulation air DTH hammer reaming bit

钻头外径Ø600 mm，前引导钻头直径Ø216 mm，具体设计基本参数见表1。

1.2 集束式反循环气动潜孔锤扩孔钻进原理

空压机输出的压缩空气经双壁钻具的环状间隙进入集束式反循环潜孔锤钻头的储气室，储气室内高压空气推开逆止阀进入4个潜孔子锤驱动活塞高速冲击锤头，锤头产生巨大的冲击力破碎孔底岩石，完成高效冲击碎岩。做功后的锤头尾气具有一定的压力，尾气压力大于钻杆中心排渣通道内气体压力，因此锤头尾气在孔底旋流过程中携带孔底岩屑进入钻头排渣口，通过排渣口经钻头、双壁钻杆中心通道排出地表，形成反循环连续排渣，实现集束式反循环潜孔锤钻头高效钻进[6]。

表 1　集束式反循环气动潜孔锤扩孔钻头参数

Table 1　Parameters of cluster-type reverse-circulation air DTH hammer reaming bit

参　数　项	参　数　值
钻头外径/mm	Ø600
前引导钻头直径/mm	Ø216
子锤型号	SPM65A-JS148-203
加工形式	机械加工与铆焊、焊接相结合
上接头连接螺纹	7 5⁄8 REG pin
中心管规格/mm	Ø177.8×22
前引导钻头连接螺纹	4 ½ REG pin
子锤数量/个	4
风量/(m^3·min^{-1})	70
压力/MPa	2.5
钻头质量/kg	2400

2　理论计算与数值仿真

2.1　钻头中心管强度计算

当钻头外壳体发生卡钻时，为了解卡有时需向上提拉再用转盘扭转。施工中常用的 TSJ2000 型水源转盘钻机扭矩 22500 N·m，钻头中心管极限扭矩 Q_T 大于转盘最大扭矩才能保证施工安全，钻头中心管扭矩强度计算如下[7]：

$$Q_T=\frac{10^{-5}\times 1.16J}{D}\sqrt{10^4Y_m^2-\frac{P^2}{A^2}} \tag{1}$$

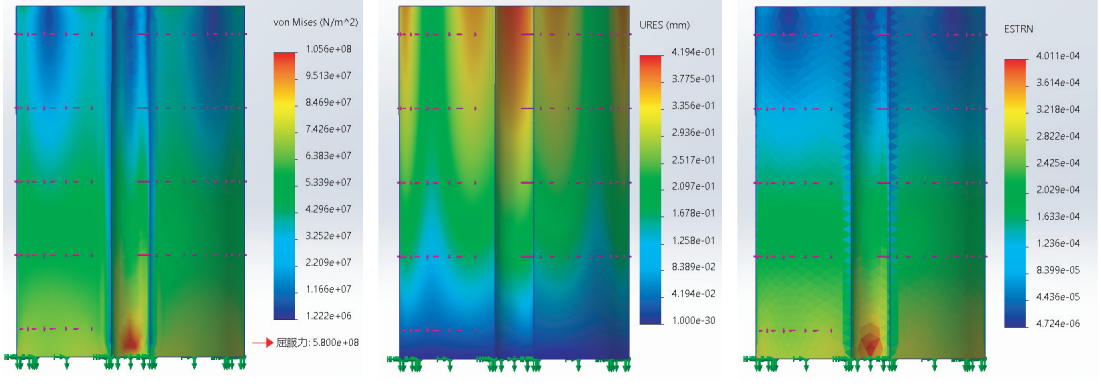
式中：J——管体极惯性矩，$J=\pi(D^4-d^4)/32=6.661\times10^7$ mm^4；D——管体外径，177.8 mm；d——管体内径，133.8 mm；Y_m——材料最小屈服强度，325 MPa；P——拉伸负荷，750000 N；A——管体横截面积，11653.84 mm^2。

根据式(1)计算得 Q_T=137380.43 N·m，在卡钻情况下，钻杆柱 750000 N 拉力下的极限破坏扭转大于钻机转盘设计扭矩 22500 N·m，钻头中心管选择 Ø177.8 mm×22 mm P110 钢级无缝管，在孔内卡钻受拉的情况下能够承受钻机转盘扭矩。

2.2　钻头外缘有限元动力学仿真(ANSYS)

钻头护筒是集束体外缘最薄弱的结构件，也是抗扭矩最大边界[8-9]，因此通过有限元分析钻头外围。

图 2(a)为钻头护筒在 25000 N·m 扭矩作用下的 Von Mises 等效应力分布。由图可知：最大应力值为 103.6 MPa，位于护筒根部固定约束端。应力沿护筒轴向自固定端向自由端呈递减趋势，表明该端部为扭矩传递的主承载截面，也是整体结构的力学薄弱环节。高应力区集中分布于固定端附近约 1.5 倍护筒外径范围内，其余区域应力水平均低于 40 MPa，应力分布呈现明显的不均匀性。该分布形态符合圆轴扭转理论中“约束端产生最大剪应力”的基本规律，也与实际工况中护筒端部承受反力偶的力学特性一致。



(a) 应力　　(b) 位移　　(c) 应变

图 2　钻头外缘薄弱构护筒有限元分析

Fig.2　Finite element analysis for weak-structure casing on the outer edge of the bit

位移分析结果如图 2(b)所示，最大合位移为 0.412 mm，发生于护筒自由端。位移沿轴向自固定端至自由端逐渐累积增大，符合扭转角随长度线性增加的弹性力学规律。该变形量在单纯静扭矩工况下数值较小(相对于典型护筒尺寸，相对扭转变形率<0.05%)，表明护筒在 25000 N·m 扭矩下具备

良好的扭转刚度。若该护筒需与轴类零件配合，建议校核0.412 mm的变形量是否会对配合公差（如过盈量0.02～0.05 mm）产生干涉影响。

应变云图2(c)显示：最大等效应变为3.85×10^{-4}，出现在与最大应力相同的根部位置。该应变值处于材料弹性应变范围之内（16Mn钢屈服应变约1.7×10^{-3}），进一步印证护筒当前处于线弹性工作状态，材料性能未发生塑性退化。

2.3 耗气量与反循环排渣参数

设计的集束式反循环潜孔锤圆周均布4个潜孔子锤，型号SPM65A-JS148-203（耗气量12～20 m^3/min），选择2台风量35 m^3/min、工作压力2.5 MPa的空压机，合计总风量70 m^3/min，大于4个单体潜孔锤最小用风量。潜孔锤风量参数详见表2。

表2 潜孔锤风量参数

Table 2 Airflow parameters of the DTH hammer

子锤型号	SPM65A-JS148-203
锤头直径/mm	203
单锤用风量/(m^3·min^{-1})	12～20
子锤数量/个	4
总耗气量/(m^3·min^{-1})	48～80
工作压力/MPa	1.1～1.7
单锤冲击功/J	780

反循环扩孔钻进时，为了确保冲击功、有效排渣和冷却钻头，要对反循环排渣和潜孔锤用风量参数进行合理匹配。根据实际钻孔直径Ø600 mm及钻头结构特点，推荐风量应达到48 m^3/min以上，以满足冲击功要求。环空空气流速15～20 m/s，岩屑上返速度≥3.0 m/s[10-11]，确保岩屑及时返出孔口，提高钻进效率并降低孔内事故风险。反循环钻进上返风量计算如下：

$$Q_e=(120\sim140)dV \tag{2}$$

式中：Q_e——空压机额定供气量（标准状态风量），m^3/min；d——内管上返通道内径（岩屑＋气液混合流的上返孔），m；V——气液固混合流体在内管的设计上返速度，m/s；公式系数：一般工况取120，大颗粒岩屑、漏失地层、深孔取上限144。

双壁钻杆内管内径Ø102 mm，当混合流上返速度为3 m/s时，根据式(2)计算得上返排渣最小风量为36.72 m^3/min。同时，为了满足4个潜孔子锤冲击做功，最小风量需要48 m^3/min，因此施工中用2台空压机，总风量70 m^3/min，大于反循环钻进排渣和潜孔子锤做功所需最小风量，满足施工要求。

2.4 钻头加工与室内试验

2.4.1 钻头加工工艺

材料选型：钻头的上接头、中心管均选用地质钻探接头材质，其余集束体上的结构件均选用焊接性能较好的16Mn材质，潜孔子锤型号为SPM65A-JS148-203。

钻头的加工装配工艺流程见图3。

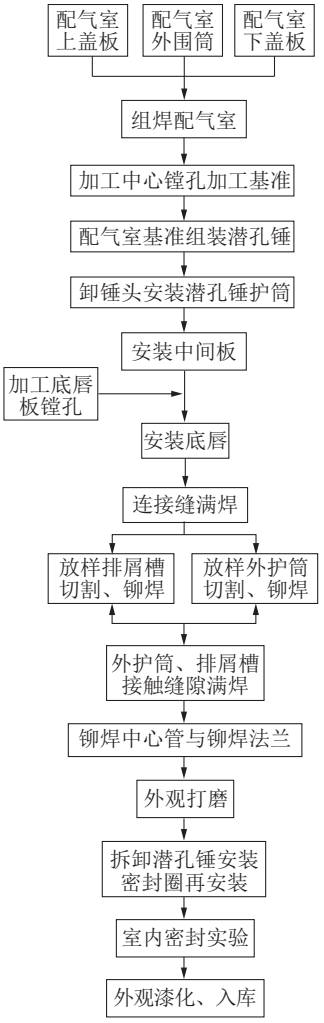


图3 钻头加工装配流程

Fig.3 Bit machining and assembly flowchart

2.4.2 室内试验

加工生产的Ø600 mm集束式反循环气动潜孔锤扩孔钻头在试验平台检测配气室密封性、钻头旋转稳定性、潜孔子锤冲击频率及同频情况、总冲击功、反循环排渣通道畅通情况等[12-15]，经试验台检测

符合设计标准后,进行工业性试验施工。

3　现场工程应用试验

3.1　钻孔揭露地层

(1)三叠系中统铜川组T_2t:粉砂岩、泥质砂岩为主,局部细粒砂岩夹粉砂质泥岩,未钻穿。地层岩性研磨性强,岩石可钻性等级6～7级。

(2)侏罗系下统富县组J_1f:砂质泥岩、灰色角砾岩、砾岩及含砾粗砂岩,底部为一层巨厚的灰白色长石石英粗粒砂岩,具斜层理。地层厚度243.5 m,岩石可钻性等级7～8级。

(3)白垩系下统宜君组K_1y:岩性为紫灰色块状砾岩,砾石成分以石灰岩为主,偶见石英砾,滚圆度好,分选性差,泥钙质胶结。层底为灰绿色粉砂岩与细砂岩。层厚66.5 m,岩石可钻性等级6～8级。

(4)第四系Q:岩性为残坡积层、腐殖土,厚度10 m,岩石可钻性等级1～3级。

3.2　钻孔结构

根据地层特点,本次施工的XC01煤矿大口径投料孔先完成先导孔施工,然后分两次扩孔,一开松散层扩孔孔径Ø800 mm,下入Ø700 mm×10 mm套管并水泥固井,二开基岩地层采用Ø600 mm集束式反循环气动潜孔锤扩孔钻头完成扩孔施工。设计钻孔结构如图4所示。

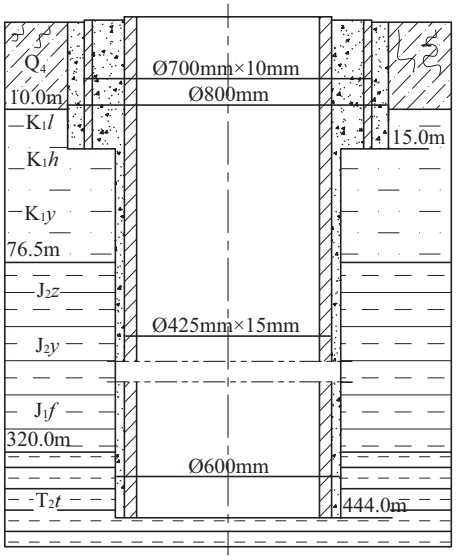


图4　XC01矿山大口径投料孔钻孔结构

Fig.4　Drilling structure of large-diameter feeding hole XC01

3.3　配套钻探设备

钻孔施工主要设备:TSJ2000/660型水源钻机1套,最大提升力750 kN,一层工作平台高度1.5 m;3NB-350型泥浆泵1台;500、150 kW厢式发电机组各1台;Ø127 mm钻杆、Ø159 mm钻铤、Ø203 mm钻铤等配套钻具。

施工Ø600 mm扩孔用主要设备有Ø600 mm集束式反循环气动潜孔锤扩孔钻头1只、空压机2台(风量35 m^3/min)及高压管汇、Ø168/114 mm双壁钻杆500 m。

施工现场见图5。



图5　试验施工现场

Fig.5　Test-site construction

3.4　基岩扩孔钻进参数

应用新产品Ø600 mm集束式反循环气动潜孔锤扩孔钻头进行基岩层扩孔,钻具组合从下而上依次为Ø600 mm集束式反循环气动潜孔锤扩孔钻头、变径接头(双层)、Ø168/114 mm(内径Ø102 mm)双壁钻杆、191 mm×191 mm双壁主动钻杆、气盒子、水龙头及排渣管。其中气盒子进气弯头连接3 in(1 in=25.4 mm,下同)高压胶管一端,高压胶管另一端连接三通接头,三通接头连接2根并联的2 in高压胶管,2 in高压胶管分别连接空压机。现场扩孔钻进参数见表3。

3.5　施工中存在的问题及解决方法

在集束式反循环空气潜孔锤扩孔钻头钻进过程中,遇到一些问题,根据出现的问题,现场采取相应措施,确保了空气扩孔钻进顺利进行。

(1)应用Ø600 mm大口径集束式反循环气动潜

表3 钻进技术参数

Table 3 Drilling technical parameters

扩孔直径/mm	钻压/kN	转速/(r·min^{-1})	工作风量/(m^3·min^{-1})	工作风压/MPa	平均钻进速度/(m·h^{-1})
600	18～40	27	70	1.1～1.5	6.5

孔锤扩孔钻进初始不能连续反循环排渣,出现正、反循环交替的现象。钻进深度28 m以后基本实现反循环排渣。

解决方法:孔口安装自行研制的专利产品——孔口导流装置封闭孔口,引导形成反循环,待正常反循环连续排渣,向孔内及时注入钻井液,并在孔内保持一定水位,降低钻具内外水头压力差,实现持续稳定反循环排渣。

(2)前导向钻头端部吸渣口出现岩屑堵塞现象,特别是在泥岩地层扩孔钻进,如8～45 m白垩系下统宜君组地层,岩性以灰紫、灰绿色粉砂岩与细砂岩为主,夹薄层泥岩,出现反循环不出渣现象,频繁堵塞进渣口。

解决方法:及时更换直径为80～120 mm进渣口的前引导钻头,减少堵塞进渣口次数。钻进到砾岩地层更换直径为50～90 mm进渣口的前引导钻头,防止大粒径岩屑进入内管形成拥堵。

(3)反循环扩孔钻进过程中,5 in排渣管磨损破裂频繁。

解决方法:水龙头鹅颈弯管排渣口安装7 in低压耐磨橡胶管,降低气、液、固三相混合物的流速,减缓对橡胶排渣管的磨损。

4 应用效果

Ø600 mm集束式反循环气动潜孔锤扩孔钻进技术在铜川华能煤矿投料孔扩孔钻进施工应用中,突破了大口径反循环不能连续排渣的技术瓶颈,解决了扩孔周期长、成本高的难题。

该钻孔设计深度444 m,在孔深15～444 m采用集束式反循环气动潜孔锤扩孔钻进429 m(孔深302 m时潜孔锤背压过大,增加一台100 m^3/min、25 MPa增压机完成扩孔施工)。在砾岩、砾岩钙质胶结地层,钻进效率4.2 m/h,比常规扩孔钻进效率提高5倍,砂岩、泥质砂岩地层钻进效率6.5 m/h,比常规扩孔钻进效率提高3.8倍,排渣率96%以上,平均钻效提高26%,钻头寿命提升20%,最大排渣粒径40 mm,最大程度减少了孔底重复破碎,综合成本下降41%

5 结论与建议

(1)集束式反循环气动潜孔锤扩孔钻头的研制,在总结以往反循环失败的施工案例基础上,改进了设计,把原来底唇板设置多个吸渣口改为前引导钻头中心管上唯一吸渣口。这种设计有利于把孔底压力集中于一个出口,避免了排气对流抵消能量的现象,实现了顺利排渣,提高了扩孔钻进效率,大幅度压缩了工期,综合成本下降明显。

(2)改进设计的集束式反循环气动潜孔锤扩孔钻头,通过有限元法分析整体强度,保证了钻头的应用施工安全,后续对于潜孔子锤的尾气排渣进行流体分析,优化钻头的吸渣口位置、大小、形状等,逐步完善集束式反循环气动潜孔锤钻头的钻进工艺。未来将持续改进钻头的结构、强度、稳定性等,把集束式反循环气动潜孔锤(包括扩孔式)钻头推广至应用前景广泛的基础工程、矿山救援等大口径施工中,提高基岩大口径钻进效率,节约施工成本。

参考文献(References):

[1] 莫海涛,郝世俊,赵江鹏.煤矿区地面大直径钻孔成孔关键技术与装备[J].煤炭科学技术,2021,49(5):190-197.
MO Haitao, HAO Shijun, ZHAO Jiangpeng. Key technology and equipment of hole-forming for surface large diameter borehole in coal mine area[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5):190-197.

[2] 刘文革,曹继玉,刘春明.集束式反井气动潜孔锤钻进工艺在大口径煤矿排水孔施工中的应用[J].中国煤炭地质,2015,27(3):49-51,69.
LIU Wenge, CAO Jiyu, LIU Chunming. Application of clustered reverse circulation pneumatic DTH hammer technology in large diameter coalmine drainage borehole operation[J]. Coal Geology of China, 2015,27(3):49-51,69.

[3] 王清岩,吕红权,高翼,等.旋挖钻机嵌岩桩施工用反循环潜孔锤钻具研究[J].工程机械,2013,44(10):14-18.
WANG Qingyan, LÜ Hongquan, GAO Yi, et al. A study on reverse-circulation down-the-hole hammer drilling tools for rock pile construction using rotary drilling rigs[J]. Construction Machinery and Equipment, 2013,44(10):14-18.

[4] 高喜,尹强.集束式潜孔锤的设计与应用[J].工程机械,2025,56(9):94-99.
GAO Xi, YIN Qiang. Design and application of cluster down-the-hole hammer[J]. Construction Machinery and Equipment, 2025,56(9):94-99.

[5] 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.
ZHAO Jiangpeng, HAO Shijun. Application of pneumatic DTH hammer in drilling rescue of mine accidents[J]. Coal Geology & Exploration, 2022,50(11):24-34.

[6] 莫海涛.集束式潜孔锤水柱密封反循环形成机理与过程控制研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2021.
MO Haitao. Research on reverse circulation formation mechanism and process control of cluster-type pneumatic DTH hammer with water column seal downhole[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2021.

[7] 杜晓瑞,李华泰.钻井工具手册(2012版)[M].北京:中国石化出版社,2013.
DU Xiaorui, LI Huatai. Handbook of Drilling Tools (2012)[M]. Beijing: Sinopec Press, 2013.

[8] 刘振东.大孔径集束式潜孔锤结构与动力特性的研究[D].大庆:东北石油大学,2013.
LIU Zhendong. A study on the structure and dynamic characteristics of large-diameter bundled down-the-hole hammers[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.

[9] 赵江鹏.扩孔用集束式反循环潜孔锤设计与试验[J].煤矿安全,2016,47(1):106-109.
ZHAO Jiangpeng. Design and test of cluster reverse circulation DTH hammer for reaming[J]. Safety in Coal Mines, 2016,47(1):106-109.

[10] 石智军,李泉新.煤矿区钻探技术装备新进展与展望[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):150-153,169.
SHI Zhijun, LI Quanxin. New progress and prospect of drilling technology and equipment in coal mine area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10):150-153,169.

[11] 袁志坚,耿建国,熊亮.气举反循环钻进技术在煤矿瓦斯抽排井中的应用[J].中国煤炭地质,2014,26(1):63-66.
YUAN Zhijian, GENG Jianguo, XIONG Liang. Application of air-lift reverse circulation drilling technology in coalmine gas drainage wells[J]. Coal Geology of China, 2014,26(1):63-66.

[12] 蒋荣庆,殷琨,王茂森,等.大直径基岩孔施工难点及解决途径[J].探矿工程(岩土钻掘工程),1999(增刊1):330-334.
JIANG Rongqing, YIN Kun, WANG Maosen, et al. Challenges and solutions in the construction of large-diameter bedrock boreholes[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 1999(S1):330-334.

[13] 王茂森,殷琨,张晓光.大直径环式组合潜孔锤及钻进工艺研究[J].地质与勘探,2006,42(2):90-92,96.
WANG Maosen, YIN Kun, ZHANG Xiaoguang. Full diameter ring combination drowning drift and drilling technology[J]. Geology and Exploration, 2006,42(2):90-92,96.

[14] 马岸彪,刘洋,杨日权.一种集束式潜孔锤:CN201710835441.7[P].2018-02-13.
MA Anbiao, LIU Yang, YANG Riquan. A clustered down-the-hole hammer: CN201710835441.7[P]. 2018-02-13.

[15] 赵江鹏,石智军,王四一,等.扩孔用反循环集束式潜孔锤:CN201410747538.9[P].2015-04-08.
ZHAO Jiangpeng, SHI Zhijun, WANG Siyi, et al. Reverse-circulation clustered down-the-hole hammer for hole enlargement: CN201410747538.9[P]. 2015-04-08.

(编辑　王文)