



# 基于离散元的铣挖破礁施工参数研究<sup>\*</sup>

汤德颖<sup>1</sup>, 阿比尔的<sup>1</sup>, 裴邦学<sup>2</sup>, 李春军<sup>2</sup>, 刘明维<sup>1</sup>, 杜健如<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 长江重庆航道工程局, 重庆 400010)

**摘要:** 为解决生态清礁的迫切需求, 铣挖法作为机械开挖岩石的方法被用于水下清礁。本文根据铣挖清礁的现场试验资料, 基于离散元 3DEC 模拟铣挖清礁的过程, 研究不同施工参数(输出扭矩、工作压力、吃刀深度、摆臂速度)的破礁规律。模拟结果表明: 输出扭矩和工作压力对铣挖头的运转情况影响显著, 过大的工作压力导致铣挖头出现卡刀现象; 铣挖头卡刀会增加截割阻力影响截齿寿命; 铣挖头正常运行的比能耗随工作压力的增大而减小。摆臂铣削的截割阻力和铣挖效率均随吃刀深度和摆臂速度增大而增大; 比能耗随吃刀深度的增大而减小, 与摆臂速度呈指数减小的趋势。研究成果对铣挖破礁实际施工具有重要参考意义。

**关键词:** 生态清礁; 铣挖施工参数; 截割阻力; 铣挖效率; 比能耗

中图分类号: U616+.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0197-07

## Construction parameters of milling reef based on discrete element method

TANG Deying<sup>1</sup>, ABI Erdi<sup>1</sup>, PEI Bangxue<sup>2</sup>, LI Chunjun<sup>2</sup>, LIU Mingwei<sup>1</sup>, DU Jianru<sup>2</sup>

(1. College of River and Ocean, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau, Chongqing 400010, China)

**Abstract:** Regarding the urgent need of ecological reef clearing, milling method as a mechanical rock excavation method is used in underwater reef clearing. According to the field test data of milling and clearing the reef, based on the discrete element 3DEC simulation of the process of milling and clearing the reef, this paper studies the reef breaking law of different construction parameters (output torque, working pressure, knife depth, swing arm velocity). The simulation results show that the output torque and working pressure have significant influence on the operation of milling head, the over-high working pressure leads to the clamping phenomenon of the milling head. Milling head stuck tool will increase cutting resistance and affect the life of the cutter. The specific energy consumption of normal operation of milling head decreases with the increase of output torque and working pressure. The cutting resistance and milling efficiency both increase with the increase of cutting depth and swing arm velocity. The specific energy consumption of reef milling decreases with the increase of the cutting depth and has an exponential decreasing relationship with the swing arm velocity. The research results have important reference significance for the actual construction of milling and breaking reef.

**Keywords:** ecological reef clearing; milling construction parameters; cutting resistance; milling efficiency; specific energy consumption

收稿日期: 2022-11-06

\*基金项目: 长江重庆航道工程局科技项目 (cqjt-2021-202)

作者简介: 汤德颖 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水下非爆式清礁。

通讯作者: 阿比尔的 (1988—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为岩石力学和数值极限分析。E-mail: abierdi@163.com

长江航道是我国内陆水上运输的重要航道，也是我国规划“三横一纵”内河交通运输网的重要组成部分<sup>[1]</sup>。“一带一路”倡议及长江经济带、交通强国、长江上游航运中心等国家战略的实施，迫切需要提升长江航运能力。在“生态优先、绿色发展”的理念要求下。生态影响较小的整治技术与施工工艺在航道建设中广泛应用<sup>[2]</sup>。铣挖法作为一种机械开挖法，相较于水下钻爆法具有不产生冲击波，水下震动较小，对水生生物、水生环境影响较小，适用性强的特点，目前已成功应用于长江上游朝涪段航道整治、杭州紫之隧道<sup>[3]</sup>、重庆枢纽铁路新红岩隧道<sup>[4]</sup>、浏阳河隧道<sup>[5]</sup>、水下石方开挖<sup>[6]</sup>等工程，是一种新型的生态清礁方法。

许多学者针对铣挖破岩的相关参数进行了研究。Liu 等<sup>[7]</sup>基于 Evans 的截割模型推导铣挖截齿旋转截割力学模型；王立平等<sup>[8]</sup>考虑岩石的脆性指数，推导铣挖截齿峰值截割力计算公式；Wang 等<sup>[9]</sup>建立了镐形截齿的峰值切削力和平均切削力计算模型；Wang 等<sup>[10]</sup>研究岩石切割性的变化规律，得到截齿旋转切割矿石的最佳应力条件和切割参数；周游等<sup>[11]</sup>、王峥嵘等<sup>[12]</sup>通过 LS-DYNA 数值模拟，研究了截齿安装角对截割效率的影响；马超<sup>[13]</sup>利用离散元 PFC 模拟了不同截割参数和不同煤岩结构面对旋转截割效率的影响；肖扬等<sup>[14]</sup>利用 LS-DYNA、谭因军等<sup>[15]</sup>利用离散元 PFC 研究了吃刀深度、截割厚度、铣挖方式等铣削参数与铣削比能耗的关系。

当前铣挖破岩法主要用于陆域环境的施工，而水下破礁时，由于视线受阻，操作人员无法观察到铣挖头运转和礁石破损情况，未能及时调整铣挖头的吃刀深度和摆臂速度，铣挖头易出现空转或卡刀的情况，影响铣挖破礁的整体效率。因此本文根据铣挖清礁的现场试验参数，基于离散元 3DEC 对铣挖水下施工参数进行研究，通过建立铣挖施工参数的破礁规律，提出施工参数的匹配关系，旨在为水下铣挖破礁施工提供参考依据。

## 1 铣挖清礁现场试验

为探究铣水下挖清礁技术的可行性，在长江上游朱沱段东溪口水道金堆子水域开展现场试验。试验区域长约 70 m，纵向不分段施工；横向约 40 m，采取分条施工，考虑到铣挖有效活动半径，按 1 条 8 m，整个区域分 5 条，逐条逐断面铣挖，以避免漏铣。图 1 为现场施工。

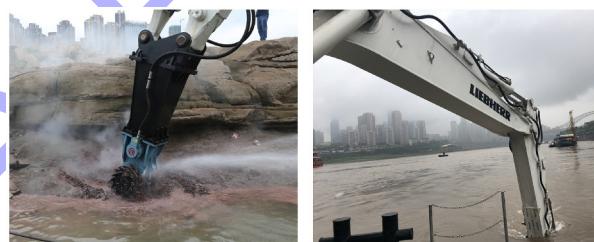


图 1 铣挖清礁现场试验

通过扫测铣挖前后河床地形，现场试验的清礁方量为 782.7 m<sup>3</sup>，达到预期目标。同时对铣挖施工过程的时间成本进行分析，得出本次铣挖清礁现场试验的施工工效和成本，见表 1。

表 1 铣挖现场试验的工效及成本分析

总施工时间/h	净工作时间/h	时间利用率/%	清礁方量/m <sup>3</sup>	总成本/万元	小时产量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	单方成本/(元·m <sup>-3</sup> )
1 032	194.00	18.88	782.7	165.86	4.03	2 119.13

通过现场铣挖试验发现，利用铣挖机对水下礁石的破碎具有一定的可行性，但工艺参数控制仍不清楚，主要表现在：1) 铣挖施工船水上定位过程复杂、耗时长，有效施工时间短。2) 铣挖的破礁深度受环境影响大，特别是大流速条件下铣挖精度差。3) 铣挖工艺的灵活性较高，对浅水域、小面积、少方量的碍航孤礁点的清礁效果较

为理想。4) 铣挖的施工参数受人为影响较大，与操作手的熟练程度有关，且目前没有适用于水下清礁的施工参数选取办法。

## 2 离散元数值模拟

为进一步分析水下铣挖工艺参数对清礁效率的影响，建立 3DEC 水下铣挖破礁分析模型，研

究不同施工参数(输出扭矩、工作压力、吃刀深度、摆臂速度)下的损伤演化规律。

## 2.1 模型建立

计算模型在 Rhino/Griddle 软件中建立平面应变的铣挖破礁分析模型后导入 3DEC 中, 其中铣挖头根据罗克韦尔 G60 铣挖头参数; 铣挖头和岩石模型尺寸见图 2, 岩石网格尺寸为 0.2 m, 其中铣挖关键区域的网格细化为 0.02 m。根据铣挖破礁现场试验, 破碎后的岩石碎屑粒径约为 5 cm, 设置的网格满足工程精度要求。网格选用四面体单元, 铣挖头划分为 843 个单元, 视为无变形的刚体模型; 岩石总计 2 873 个单元, 满足摩尔-库仑破坏准则。水下礁石为砂岩, 根据学者的相关统计<sup>[16-17]</sup>, 礁石的物理力学参数见表 2。

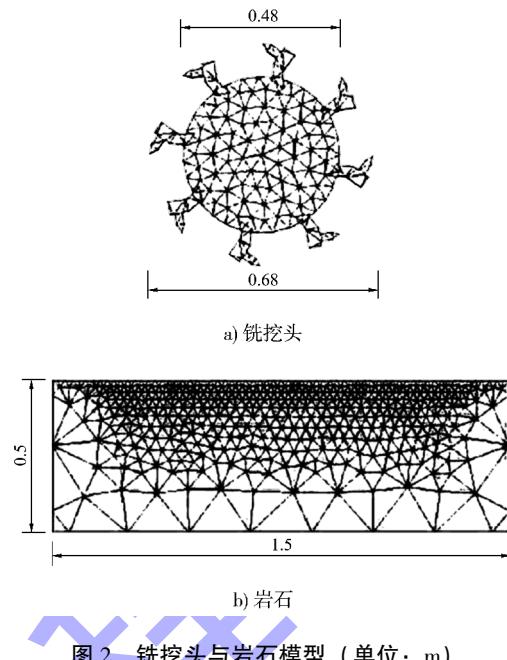


图 2 铣挖头与岩石模型 (单位: m)

表 2 岩石模型力学参数

抗压强度 $\sigma_u$ /MPa	抗拉强度 $\sigma_t$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比 $\nu$	密度 $\rho$ /(kg·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角 $\varphi$ /(°)	黏聚力 $c$ /MPa
30	2.00	5.78	0.22	2.495	46.40	6.75

## 2.2 施工参数选取

根据现场试验结果, 输出扭矩  $T$  是铣挖头在破岩过程中的关键参数, 其大小影响破岩的效率。工作压力  $F$  是液压系统传递给铣挖头对岩石的压力, 以抵抗切割下方岩石产生的阻力, 铣挖头可与岩石始终保持接触。吃刀深度  $h$  和摆臂速度  $v$  共同影响摆臂铣削过程的铣挖效率和铣削能量利用率。因此铣挖破岩的效率主要受  $T$ 、 $F$ 、 $h$  和  $v$  4 个因素的影响<sup>[18]</sup>。参照罗克韦尔 G60 铣挖机的工作参数以及相关施工资料<sup>[19]</sup>, 在平面应变条件下,

铣挖施工参数的取值范围见表 3。

通常, 铣挖的破岩过程主要包括进钻刨槽和摆臂铣削两个过程。其中, 进钻刨槽过程是铣挖头向下破岩形成 1 个凹槽, 见图 3a), 该过程破礁效率主要受  $T$  和  $F$  的影响; 摆臂铣削是在槽面形成后通过摆臂按指定路径进行破碎, 见图 3b), 该过程的关键施工参数为  $h$  和  $v$ 。在实际施工中, 通过不断循环上述两个过程实现对礁石的破碎, 本文对两个过程进行分析, 研究不同施工参数下的破礁规律。

表 3 铣挖施工参数取值范围

铣挖头型号	扭矩 $T$ /(kN·m·m <sup>-1</sup> )	工作压力 $F$ /MPa	吃刀深度 $h$ /m	摆臂速度 $v$ /(m·s <sup>-1</sup> )
罗克韦尔 G60	11.1~26.8	25~40	0.05~0.15	0.05~0.20

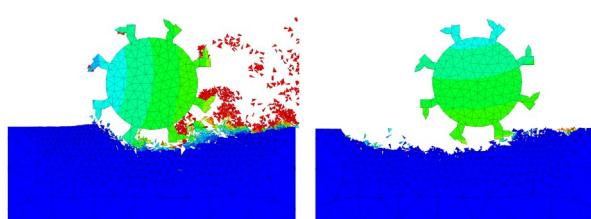


图 3 铣挖破礁过程模拟

## 2.3 评价指标

为评价各种施工参数组合工况下的铣挖破礁优劣性, 以降低铣挖破礁过程中的截齿能耗和磨损, 提高铣挖破礁的施工效率为目标, 基于以下 3 个评价指标对施工参数进行优选。

1) 截割阻力  $F_f$  是铣挖破礁过程中岩石对铣挖头的阻力, 其大小影响铣挖头的运转情况和截

齿的使用寿命。在 3DEC 中通过计算程序记录铣挖头的截割阻力, 由于  $F_f$  随铣挖时间波动较大, 按式(1)对记录的离散数据曲线积分求其平均值。

$$F_f = \frac{\int_0^{t_0} F_f(t) dt}{t_0} \quad (1)$$

式中:  $F_f$  为截割阻力, kN;  $F_f(t)$  为记录的截割阻力曲线, kN;  $t_0$  为铣挖时间, s。

2) 铣挖效率  $\eta$  是单位时间内铣挖头破碎岩石体积的大小, 反映铣挖破岩的快慢, 按式(2)计算。

$$\eta = \frac{V}{t_0} \quad (2)$$

式中:  $\eta$  为铣挖效率,  $m^3/h$ ;  $t_0$  为铣挖时间, h;  $V$  为开挖岩石的体积,  $m^3$ 。由于本文采用平面应变分析, 得到开挖岩石的单宽破坏面积, 根据铣挖头截齿排列的宽度乘以单宽破坏面积计算出实际铣挖头开挖岩石的体积  $V$ 。此处为罗克韦尔 G60 铣挖头, 其截齿有效排列宽度取 0.4 m。

3) 比能耗  $H_w$  是截割单位体积岩石所消耗能量的大小, 反映了铣挖破礁施工参数的能量利用率。对于铣挖头旋转截割岩石的比能耗可按式(3)计算。

$$H_w = \frac{M\omega t}{V} \quad (3)$$

式中:  $H_w$  为比能耗,  $(kW \cdot h)/m^3$ ;  $M$  为扭矩,  $kN \cdot m$ ;  $\omega$  为铣挖头旋转角速度,  $rad/s$ ;  $t$  为铣挖头摆臂截割时间, s;  $V$  为截割岩石体积,  $m^3$ 。

### 3 结果及分析

#### 3.1 扭矩和工作压力的破礁影响规律

针对抗压强度  $\sigma_u = 30$  MPa 砂岩, 保持摆臂速度  $v = 0$  m/s, 设置铣挖时间为 1 s, 模拟铣挖头进钻刨槽的过程, 分别计算不同输出扭矩、不同工作压力下的破礁规律, 见表 4。

由表 4 可知, 3 种扭矩的工况下, 铣挖头在不同的时间点均出现了卡刀的情况, 随工作压力的增加, 正常运行的时间越短, 较大的扭矩可增加运行时间。在扭矩  $T = 11.52$  (kN·m) /m, 工作压力  $F = 30$  MPa 的工况下, 图 4 为铣挖头所受截割

阻力的变化曲线, 当截割阻力在截齿碰撞岩石后出现较大的波动, 且波动峰值随铣挖头下挖深度的增加逐渐增大。图 5 为铣挖头位移时程曲线, 伴随截割阻力的波动, 铣挖头在开挖过程中也上下振动。当截割阻力大于铣挖头的切割力(0.742 s)时, 铣挖头出现卡刀的情况, 且上下振动的幅度增加, 此时无法继续向下开挖, 达到单次铣挖的最大吃刀深度。

表 4 不同输出扭矩和工作压力工况的运行数据

扭矩 $T/(kN \cdot m \cdot m^{-1})$	工作压力 $F/MPa$	运行时间/s	运转情况
11.52	25	1.000	正常
	30	0.742	卡刀
	35	0.348	卡刀
	40	0.171	卡刀
14.40	25	1.000	正常
	30	1.000	正常
	35	1.000	正常
	40	0.573	卡刀
17.28	25	1.000	正常
	30	1.000	正常
	35	1.000	正常
	40	0.810	卡刀

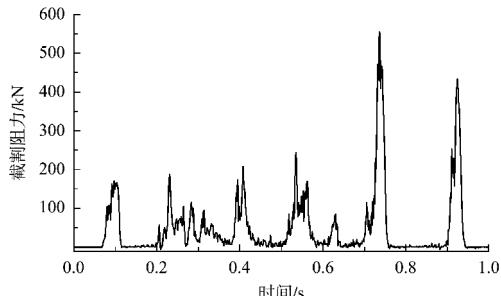


图 4  $T = 11.52$  (kN·m) /m,  $F = 30$  MPa 工况下, 铣挖头截割阻力与时间变化曲线

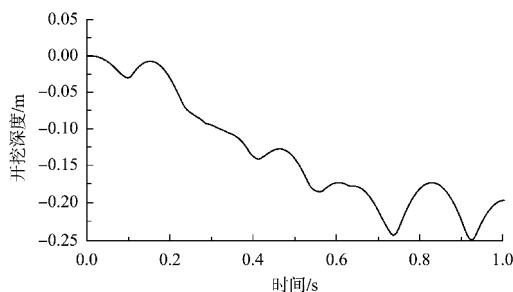


图 5  $T = 11.52$  (kN·m) /m,  $F = 30$  MPa 工况下, 铣挖头位移时程曲线

将各种工况的截割阻力变化曲线按式(1)计算其平均值, 得到截割阻力与各种工况的关系, 见图6。截割阻力随工作压力的增大均呈增大的趋势。结合表4中铣挖头的运转情况, 铣挖头卡刀时对应的截割阻力突增, 主要原因是工作压力增大, 导致铣挖头与岩石之间的摩擦力增大, 过大的工作压力使铣挖头停止运转, 铣挖头的截割阻力相较于正常运转时增大。对比不同扭矩, 在较大的输出扭矩工况下, 铣挖头的转速大, 截齿碰撞岩石产生的阻力也越大。因此, 输出扭矩越大, 截割阻力也越大。

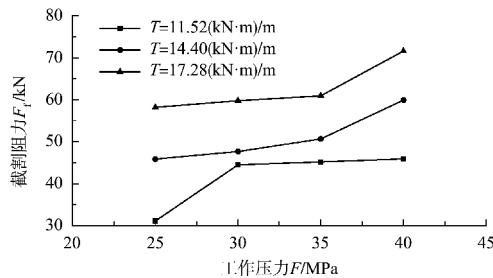


图6 截割阻力与工作压力的关系

各种扭矩和工作压力组合工况下的最大吃刀深度, 见图7, 可知当铣挖头正常运行时, 最大吃刀深度随工作压力的变化不大, 但当铣挖头卡刀时, 最大吃刀深度骤降。表明铣挖头的运转情况是影响最大吃刀深度的关键因素。对比3种扭矩工况, 较大扭矩下铣挖头不容易卡刀, 最大吃刀深度随扭矩增大而增大。

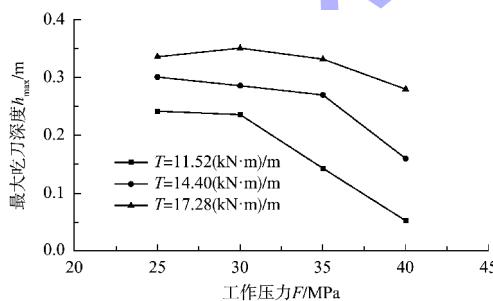


图7 各种工况下的最大吃刀深度

比能耗在不同扭矩下呈现出不同的变化规律。3种输出扭矩下比能耗与工作压力的关系, 见图8。当铣挖头正常运行时, 即输出扭矩  $T$  为 14.40~17.28 kN·m/m, 工作压力  $F$  为 25~35 MPa, 比能耗随工作压力的增大呈减小的趋势, 表明适当增

大工作压力可提高铣挖头的输出扭矩利用率, 避免实际施工时铣挖头空转的情况。较大扭矩下铣挖头的转速大, 产生的粉尘多, 此时能耗较高。

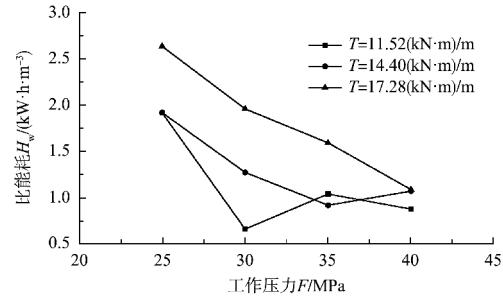
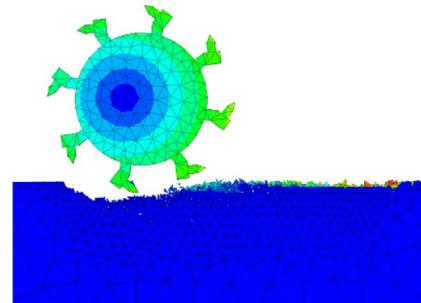


图8 比能耗与工作压力的关系曲线

### 3.2 吃刀深度和摆臂速度的破礁影响规律

吃刀深度  $h$  是铣挖头在往返作业时每次循环切割的深度, 铣挖头的摆臂速度  $v$  是铣挖头向前开挖的速度。 $h$  和  $v$  共同影响着摆臂铣削过程的铣挖效率, 因此考虑这两个施工参数, 研究其破礁影响规律。分别设置吃刀深度  $h$  为 0.06、0.12、0.15 m, 摆臂速度  $v$  为 0.05、0.07、0.10、0.20 m/s, 铣挖头转速为 75 r/min, 运行时间为 2 s, 利用3DEC 模拟铣挖头摆臂铣削过程。

摆臂速度  $v=0.1$  m/s 时 3 种吃刀深度下岩石的破坏模式, 见图9。其中 0.06 和 0.12 m 吃刀深度下的损伤范围主要集中在铣挖截齿附近, 通过铣挖截齿的研磨作用破坏岩石, 岩石存在微裂隙但并未发育, 见图9a)、b); 0.15 m 吃刀深度的破坏模式, 见图9c), 岩石内部裂隙发育延伸形成较大损伤范围。这与文献[20]的结论相符, 刀具随截割深度的增加, 岩体的破坏模式从延性破坏转变为脆性破坏, 加大吃刀深度可增加岩石的破坏范围。



a) 吃刀深度0.06 m

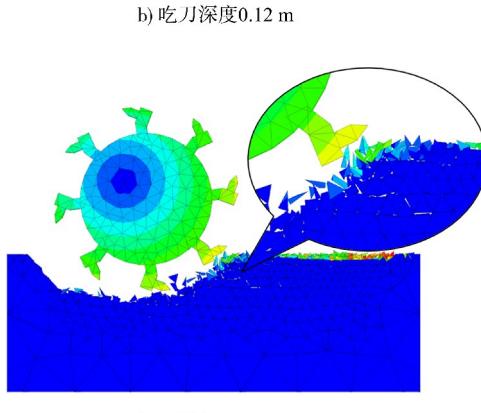
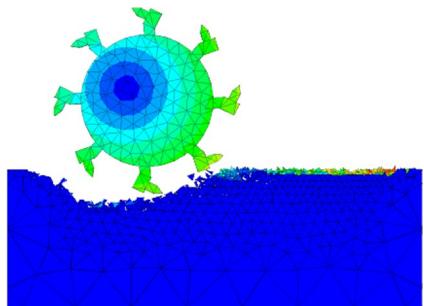


图 9 不同吃刀深度下的破坏模式

3 种吃刀深度下截割阻力与摆臂速度的关系见图 10, 截割阻力随摆臂速度增大而增大, 且吃刀深度越大, 截割阻力越大。由图 10 可知, 在较大的吃刀深度下, 截割阻力增幅较大。这是由于在较大的吃刀深度下, 铣挖头与岩石的接触面积较大, 与岩石之间的摩擦力增大, 铣挖头摆臂产生的阻力也越大。

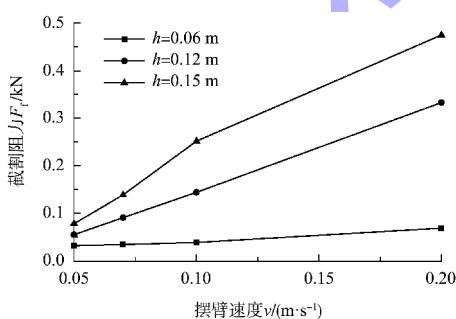


图 10 截割阻力与摆臂速度的关系

3 种吃刀深度下铣挖效率与摆臂速度的关系, 见图 11。可知铣挖效率随摆臂速度增加呈增大的趋势, 且吃刀深度越大, 铣挖效率越高。

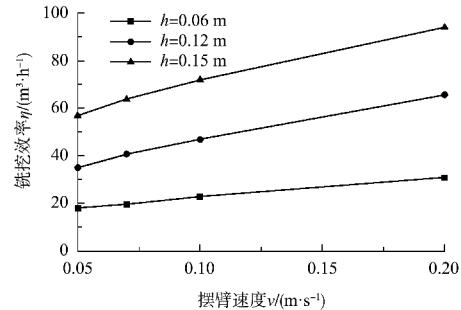


图 11 铣挖效率与摆臂速度的关系

各种吃刀深度下不同摆臂速度与比能耗的关系见图 12, 同时将散点的拟合曲线绘入图 12。可知 3 种吃刀深度下, 比能耗随摆臂速度的增加均呈指数减小的趋势, 且吃刀深度越大, 比能耗越小。吃刀深度和摆臂速度大可减少铣挖头空转的时间, 提高能量利用率。结合图 9 几种吃刀深度的破坏模式, 较小吃刀深度下铣挖头对破坏后岩石过分研磨, 形成小颗粒碎屑, 比能耗较高; 在较大的吃刀深度下岩石存在脆性破坏, 岩块在裂隙发育延伸至自由面后崩落, 破坏范围大, 此时比能耗低, 表明在较大吃刀深度下, 铣挖的输出扭矩能量利用率高。在吃刀深度  $h = 0.06 m$  时, 比能耗下降的幅度较大, 这时摆臂速度对比能耗起主导作用; 随着吃刀深度的增加, 比能耗下降的幅度逐渐降低, 当  $h = 0.15 m$  时, 摆臂速度对比能耗的影响不明显。

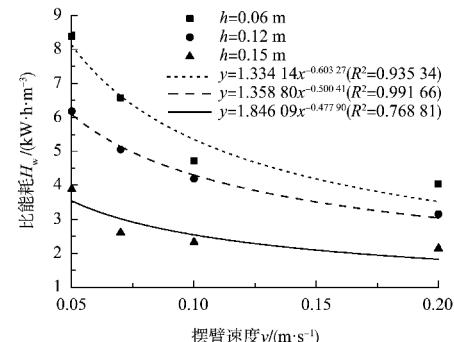


图 12 比能耗与摆臂速度的变化关系

#### 4 结论

1) 工作压力对铣挖头的运转情况影响显著, 过大的工作压力导致出现卡刀的情况。截割阻力

随输出扭矩和工作压力的增大而增大, 且卡刀后的截割阻力突增。最大吃刀深度与铣挖头的运转情况有关, 铣挖头卡刀的情况导致最大吃刀深度降低。比能耗在铣挖头正常运行时随工作压力的增大呈减小的趋势, 且输出扭矩越大, 比能耗越大。

2) 摆臂铣削的截割阻力随吃刀深度和摆臂速度增大而增大, 且吃刀深度越大, 变化幅度越大。铣挖效率与吃刀深度和摆臂速度均呈增大的趋势。比能耗随吃刀深度增大而减小, 在较大的吃刀深度下, 岩石发生脆性破坏形成更大的破坏范围。随摆臂速度的增加比能耗呈指数减小的趋势, 当吃刀深度  $h = 0.06$  m 时, 摆臂速度对比能耗起主导作用, 比能耗的降低幅度较大。

3) 实际施工时应优先保障铣挖头的正常运行, 选择合适的工作压力避免卡刀的情况, 增大工作压力减少铣挖头空转时间。增大输出扭矩可提升最大吃刀深度, 但截割阻力增加影响铣挖截齿的寿命, 同时比能耗的增加表明输出扭矩的能量利用率降低。摆臂铣削过程中增大吃刀深度和摆臂速度可提高铣挖破礁效率, 避免铣挖头出现空转降低比能耗, 但较大的吃刀深度和摆臂速度同样会增大截割阻力加快截齿的磨损。

## 参考文献:

- [1] 潘育明. 长江航道对现代物流的适应性研究[J]. 水运工程, 2010 (6): 77-80.
- [2] 刘东征, 毛亚辉. 环保疏浚项目工程计量方法探讨[J]. 水运工程, 2020 (S1): 128-132.
- [3] 赵春华. 浅埋暗挖隧道上软下硬地层工法转换关键技术研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12 (6): 1444-1451.
- [4] 谢达文. 悬臂式掘进机与控制爆破组合式隧道开挖技术试验研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 216-220.
- [5] 项志敏, 苛彪, 罗田郎, 等. 浏阳河隧道铣挖法工艺试验研究[J]. 铁道标准设计, 2007(S1): 74-78.
- [6] 楼周峰, 徐海文. 铣挖机在水下石方开挖工程中的应用 [J]. 地方水利技术的应用与实践, 2005 (1): 170-174.
- [7] LIU J X, MA C, ZENG Q L, et al. Discrete element simulation of conical pick's coal cutting process under different cutting parameters [J]. Shock and vibration, 2018(1): 39-48.
- [8] 王立平, 蒋斌松, 张翼, 等. 基于 Evans 截割模型的镐型截齿峰值截割力的计算 [J]. 煤炭学报, 2016, 41 (9): 2367-2372.
- [9] WANG X, LIANG Y P, WANG Q F, et al. Empirical models for tool forces prediction of drag-typed picks based on principal component regression and ridge regression methods[J]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2017 (62): 75-95.
- [10] WANG S F, TANG Y, LI X B, et al. Analyses and predictions of rock cuttabilities under different confining stresses and rock properties based on rock indentation tests by conical pick [J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2021, 31(6): 1766-1783.
- [11] 周游, 李国顺, 唐进元. 截齿截割煤岩的 LS\_DYNA 仿真模拟[J]. 工程设计学报, 2011, 18(2): 103-108.
- [12] 王峥荣, 熊晓燕, 张宏, 等. 基于 LS-DYNA 采煤机镐型截齿截割有限元分析[J]. 振动. 测试与诊断, 2010, 30(2): 163-165, 210.
- [13] 马超. 镐型截齿旋转截割煤岩过程研究及离散元模拟实验[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
- [14] 肖杨, 杨其新, 蒋雅君. 隧道铣挖法铣挖参数数值模拟研究[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(8): 100-104.
- [15] 谭因军, 蒋辉, 张志强. 基于离散元的铣挖法施工关键参数研究[J]. 路基工程, 2019(4): 202-206.
- [16] 周杰, 汪永雄, 周元辅. 基于颗粒流的砂岩三轴破裂演化宏-细观机理[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 76-82.
- [17] 罗晓龙. 三峡库区巫山段岸坡变形破坏机理研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [18] 李晓豁. 掘进机截割的关键技术研究 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 126-131.
- [19] 刘春生, 于信伟, 任昌玉. 滚筒式采煤机工作机构[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 81-153.
- [20] HE X Q, XU C S. Discrete element modelling of rock cutting: from ductile to brittle transition[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2015, 39(12): 1331-1351.

(本文编辑 赵娟)