

# 基于硬质黏土切削理论的耙齿切削阻力分析



孙守胜<sup>1,2</sup>, 钟志生<sup>1</sup>, 李章超<sup>1,2</sup>

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 2. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

**摘要:** 耙头在挖掘硬质黏土时, 耙齿切削阻力较大, 需要匹配的主机负荷也相应增加, 使得工程经济性降低。为了分析硬质黏土切削过程中耙齿切削阻力的大小及变化趋势, 优化耙头设计和使用工艺, 对一定含水率和标贯击数的硬质黏土进行多工况下耙齿水平和垂直切削阻力计算。通过计算模型对2种耙齿切削过程中土体破坏长度和宽度进行计算。结果表明: 硬质黏土水平切削阻力受切削深度、切削角度和切削宽度影响较大, 受切削速度影响较小; 进行硬质黏土切削时, 需根据实际工况选择不同类型耙齿。该切削理论计算模型可用于耙头设计和施工工艺参数优化, 为船舶施工效率的提升提供了一种理论参考。

**关键词:** 硬质黏土; 切削; 耙齿; 阻力

中图分类号: U 616+.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0215-05

## Cutting resistance analysis of draghead teeth based on hard clay cutting theory

SUN Shou-sheng<sup>1,2</sup>, ZHONG Zhi-sheng<sup>1</sup>, LI Zhang-chao<sup>1,2</sup>

(1.CCCC Tianjin Port & Waterway Prospection & Design Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2.Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** When the draghead excavates hard clay, the cutting resistance of the teeth is large, and the load of the main engine that needs to be matched is also increased correspondingly, which reduces the engineering economy. In order to analyze the value and change trend of the cutting resistance of the teeth in the cutting process of hard clay, and optimize the design and use of the draghead, we calculate the cutting resistance of teeth under multiple working conditions on the hard clay with a certain water content and standard penetration number, and calculate the length and width of soil damage during cutting by the calculation model. The results show that the horizontal cutting resistance of hard clay is greatly affected by the cutting depth, cutting angle and cutting width, and less affected by the cutting speed; when cutting hard clay, different types of teeth must be selected according to the actual working conditions. The cutting theoretical calculation model can be used for draghead design and construction process parameter optimization, which provides theoretical reference for the improvement of ship construction efficiency.

**Keywords:** hard clay; cutting; draghead tooth; resistance

耙齿切削阻力对于耙头设计来说是一个极为重要的参数, 其大小不仅影响耙头的挖掘性能, 同时影响船舶的主机运转负荷。为此, 技术人员进行了大量的理论研究和模型试验工作, 旨在得到某种土质条件下耙齿的切削阻力计算模型, 并用于指导耙头设计。对于耙头设计者来说, 耙齿

切削阻力一般通过经验公式计算获得, 但该公式相对保守, 冗余度较大, 无法准确评估耙头的整体切削阻力与船舶推进功率及航速的匹配关系。

国内外很多学者对黏土的切削阻力进行研究并取得一些理论成果。如美国学者 Wismer 等<sup>[1]</sup>在 20 世纪 60 年代进行了刀具切削黏土的室内试验研

究, 分析刀具切削黏土过程的受力情况; 1973 年, 日本东京大学 Hatamura 和 Chijiwa 教授<sup>[2-3]</sup>针对塑性壤土和塑性黏土开展了二维土壤切削的机理研究与试验工作, 对不同土壤的破坏条件、内部应力分布、不同切削深度、不同切削角度和不同切削速度条件下切削力的计算等做了细致的分析; Delft 大学的 Sape A. Miedema 教授通过现场试验和计算机仿真模拟的技术手段提出水下泥土二维切削受力模型; 2008 年, 洪国军等<sup>[4]</sup>对耙齿切削和硬质土进行了试验研究; 2015 年, 刘修成等<sup>[5]</sup>针对耙吸挖泥船耙齿切削土壤的问题, 提出基于有限元的数值模拟方法。

硬质黏土具有含水率低、内部黏聚力大、土质坚硬的特点, 属于疏浚工程中较难挖掘的一种土质, 需要机具具备较大的切削力。经验公式在此种土质方面缺少关键参数, 导致计算结果与实际挖掘阻力偏离度较大。虽然针对黏土切削的研究成果较多, 但是针对疏浚工程中硬质黏土的切削尚不能直接应用, 因此笔者基于硬质黏土切削理论研究成果, 从耙齿类型、切削速度、切削角度、切削深度等方面对耙齿的切削阻力进行计算和对比, 分析在耙齿作用下土体破坏长度及宽度的影响因素。

## 1 硬质黏土切削理论计算模型

该理论计算模型的开发以 Mckyes 教授<sup>[6]</sup>的三维力学模型为基础, 根据该模型的理论推导, 结合硬质黏土在三维切削过程中的试验数据, 综合得出适用于耙齿切削的理论计算公式:

$$F_H = F_h + F_h^* + 2F'_h \quad (1)$$

$$F_V = F_v + F_v^* + 2F'_v \quad (2)$$

式中:  $F_H$  为耙齿的水平切削力;  $F_V$  为耙齿的垂直切削力;  $F_h$  为刀片正面对土体的水平切削力;  $F_v$  为刀片正面对土体的垂直切削力;  $F_h^*$  为土体多破坏面下的水平切削力;  $F_v^*$  为土体多破坏面下的垂直切削力;  $F'_h$  为刀片两侧对土体的水平切削力;  $F'_v$  为刀片两侧对土体的垂直切削力。 $F_h$ 、 $F_v$ 、 $F'_h$  和  $F'_v$  均可通过 Mckyes 教授的三维力学模型推导

获得, 而本文所使用的三维切削力学模型则引入了土体多破坏面下刀片对土体的水平和垂直切削力, 即  $F_h^*$  和  $F_v^*$ , 用以修正 Mckyes 教授的三维力学模型未考虑的多破坏面带来的切削阻力, 并且有刀片切削土体试验数据作为支撑。该计算模型结果与硬质黏土切削试验所获得数据较为接近, 可以评价耙齿切削该土体的切削阻力。由于不同含水量土体的切削阻力变化不相同, 因此本文引用的计算模型是基于硬质黏土的含水量为 40% 的情况而建立的。

$$F_h^* = l_h w \lambda c \quad (3)$$

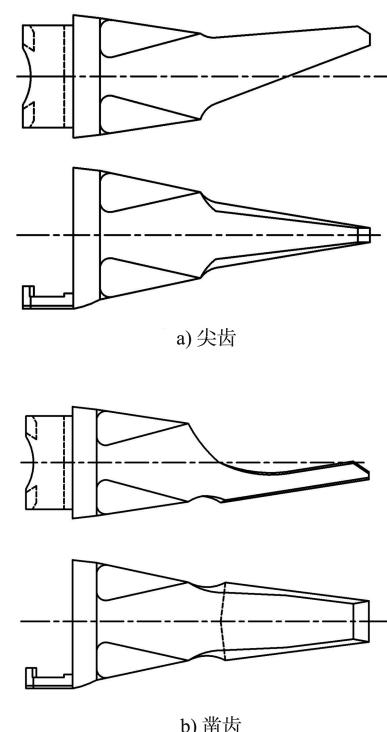
$$F_v^* = l_v w \lambda c \quad (4)$$

式中:  $l_h$  为多破坏面水平切削力系数;  $l_v$  为多破坏面垂直切削力系数;  $w$  为切削宽度;  $\lambda$  为速率系数(考虑不同速度下切削阻力的变化);  $c$  为粘聚力。

## 2 耙齿切削阻力计算

### 2.1 耙齿类型

常用耙齿型号主要有 20CB、28DS、38DS 和 48DS 及 T 型齿等。本文所研究的耙齿型号为 38DS, 其主要结构形式见图 1。



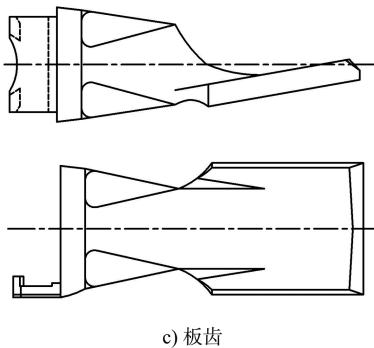


图 1 耙齿类型

38DS 耙齿主要分为 3 种, 即尖齿、凿齿或板齿, 分别用于不同土质的挖掘。尖齿用于较硬土质挖掘; 板齿用于较软土质挖掘; 凿齿所挖掘的土质则处于上述 2 种土质之间。其主要技术参数见表 1。

表 1 38DS 耙齿参数

耙齿型号	耙齿长度/mm	耙齿宽度/mm
板齿	330	140
凿齿	310	70
尖齿	310	-

表 1 中耙齿长度和宽度均为耙齿挖掘泥土时刀片与土体接触面积的有效作用数据, 其不参与挖掘部分的数据未统计在内, 保证计算结果真实可信。

## 2.2 耙齿切削阻力

耙头施工时, 其耙齿的切削角度不仅时刻发生变化, 而且耙齿所挖掘泥土的深度也随之变化, 导致耙齿的挖掘阻力也时刻发生变化, 反映到船舶上便是航行速度的变化或是主机负载的变化。因此, 进行耙头设计时, 需综合考虑耙头的切削深度、耙头运动速度和切削角度, 进而计算出不同工况下耙齿的切削阻力, 以便与船舶主机负载进行较好的匹配, 维持船舶正常的挖泥航行速度, 保证船舶挖泥产量。

### 2.2.1 耙齿切削工况

图 2 为耙头施工时耙齿切削土体的切削角度和切削深度。根据图 2 确定耙头施工的多个工况, 并通过确立的三维切削模型来计算耙齿的切削阻力。

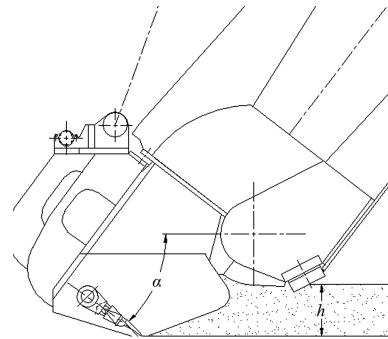
注:  $\alpha$  为耙齿切削角度( $^\circ$ )  $h$  为耙齿切削深度(mm)。

图 2 耙齿切削角度和切削深度

根据  $\alpha$  和  $h$  值分别列出耙头施工时的多个典型工况,  $\alpha$  的取值为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$ ,  $h$  的取值为  $50$ 、 $100$ 、 $150$ 、 $200$ 、 $250$  和  $300$  mm,  $\alpha$  和  $h$  多工况组合为 18 组(表 2)。

表 2 切削工况

工况	$\alpha/(^\circ)$	$h/mm$	工况	$\alpha/(^\circ)$	$h/mm$
1	30	50	10	30	200
2	45	50	11	45	200
3	60	50	12	60	200
4	30	100	13	30	250
5	45	100	14	45	250
6	60	100	15	60	250
7	30	150	16	30	300
8	45	150	17	45	300
9	60	150	18	60	300

耙齿切削阻力计算采用前述三维硬质黏土切削力学模型中式(1)~(4), 土体内部黏聚力等物理力学指标参数通过土工试验测得。由于耙头施工时的运动速度有较多变化, 因此只取几个典型的施工速度, 即  $1.0$ 、 $1.5$ 、 $2.0$  和  $2.5$  kn, 将  $\alpha$ 、 $h$  和耙头运动速度 3 个参数代入计算公式便可得到在某工况下的单齿切削阻力。

### 2.2.2 不同耙齿类型切削阻力计算与分析

由于尖齿无法准确衡量刀片宽度, 因此未对其进行切削阻力计算, 仅考虑凿齿和板齿的切削阻力, 而这 2 种类型耙齿切削阻力的计算结果及变化趋势也可作为尖齿切削阻力变化的一个参考。

根据不同的切削工况分别计算不同切削速度下 2 种类型耙齿的切削阻力, 得到耙齿切削阻力变化趋势(图 3)。

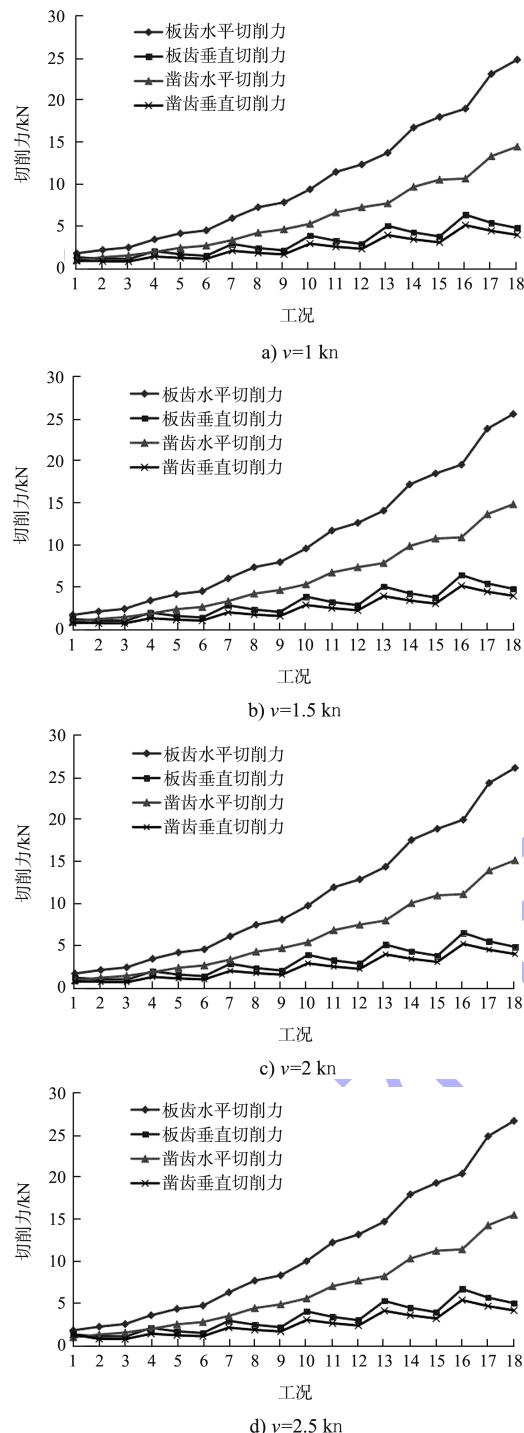


图 3 不同切削速度下板齿和凿齿的切削阻力变化趋势

从图 3 可知, 凿齿和板齿在相同切削深度、切削角度和切削速度的前提下, 其水平切削阻力变化显著, 而变化趋势基本相同, 凿齿的水平切削阻力相较于板齿的水平切削阻力下降约 40% 左右。耙齿切削深度在 150 mm 以下时, 其水平切削阻力变化比较平缓, 当切削深度继续增加时, 随着切削角度的改变, 2 种类型耙齿的水平切削阻力

变化显著。切削速度变化、其他参数不变的情况下, 耙齿切削阻力变化幅度有限。综合来看, 相较于切削角度的改变, 切削深度和耙齿宽度的改变对耙齿水平切削阻力的影响更大。

相较于水平切削阻力, 耙齿垂直切削阻力对几种参数变化影响的敏感度更低, 增幅有限。

上述计算结果均以黏土含水率 34%、标贯击数为 12 击为前提条件, 若土质含水率发生变化, 其黏土本身的物理力学性能参数将会发生变化, 导致耙齿切削阻力变化。

因凿齿相较于板齿在同等控制参数下的切削阻力小, 所以在挖掘硬质黏土时, 可根据土质情况更换耙齿型号, 以减小耙头挖掘阻力、降低船舶主机负荷。

### 3 耙齿两侧土体破坏宽度

在建立硬质黏土三维切削新开发模型过程中, 分析耙齿切削阻力受土体中心破坏区和两侧破坏区的影响, 建立了土体中心破坏区和两侧破坏区的力学平衡方程, 据此可以计算耙齿两侧土体沿一定破坏角度的破坏长度, 并根据破坏角度和耙齿宽度计算出破坏区土体的破坏宽度。耙头正常施工时, 一排耙齿在船舶拖曳力的推动下可以将一定宽度的土体切割下来, 在此过程中, 相邻耙齿之间被切割下来的土壤会互相干扰, 因此在进行耙头设计时须对耙齿间距进行合理的优化。同上节, 依然选取 18 个工况计算单齿两侧土体的破坏长度。在新开发的硬质黏土三维切削力学模型中, 其两侧破坏区域的破坏长度  $r$  的计算公式为:

$$r = d \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \beta} \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为切削角度;  $\beta$  为土体剪切破坏角;  $d$  为土体的破坏深度。耙齿总破坏宽度  $B$  的计算公式:

$$B = 2rs\sin\rho + b \quad (6)$$

式中:  $\rho$  为土体侧面破坏区角度(一般取常数值);  $b$  为耙齿宽度。

由式(5)(6)可知, 土体的破坏长度只与切削深度、切削角度和土体剪切破坏角有关, 而土体的破坏宽度不仅和上述 3 个参数有关, 还与土体

侧面破坏区角度和耙齿宽度有关。从图4可知, 土体的破坏宽度基本上随着切削角度和切削深度的增加而增加, 并且在切削深度达到峰值时最大。图4中出现的拐点主要是由于土体剪切破坏角不同而导致的。当耙头挖掘硬质黏土时阻力过大时, 可通过减少齿数来匹配船舶主机负荷, 而不影响船舶挖泥产量。

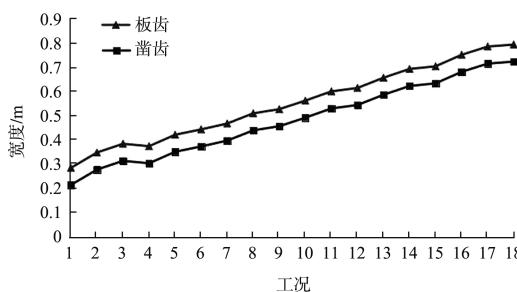


图4 板齿和凿齿两侧土体破坏宽度

#### 4 结论

- 1) 2种耙齿的水平切削阻力对切削速度的变化较对切削深度和切削角度的变化敏感性更低;
- 2) 在同等条件下, 凿齿的水平切削阻力与板齿的水平切削阻力相比, 可减小40%左右;
- 3) 耙齿切削黏土时, 随着切削参数的改变, 其垂直切削阻力变化较为平缓, 增幅有限;
- 4) 耙齿挖掘硬质黏土时被切削土体的破坏宽度只与切削深度、切削角度和土体剪切破坏角有

关, 进行耙齿排布设计时应考虑此影响因素;

5) 挖掘硬质黏土时, 可根据土质情况更换耙齿型号, 以减小耙头挖掘阻力, 维持船舶合理的航行速度, 保证船舶的挖泥产量, 将船舶主机负荷维持在一个合理水平。

#### 参考文献:

- [1] WISMER R D, LUTH H J. Performance of plane soil cutting blades in clay[J]. Transactions of the ASAE, 1972, 512: 211-216.
- [2] HATAMURA Y, CHIJHWA K. Analysis of the mechanism of soil cutting(1st report: cutting patterns of soils)[J]. Bulletin of the JSME, 1975, 18: 619-626.
- [3] HATAMURA Y, CHIJHWA K. Analysis of the mechanism of soil cutting(3rd report: distribution of stresses on cutting blade and cutting force)[J]. Bulletin of the JSME, 1976, 19: 1376-1384.
- [4] 洪国军, 林风, 王健. 耙齿切削饱和硬质土的试验研究[J]. 水运工程, 2008(8): 98-104.
- [5] 刘修成, 何炎平, 赵永生. 基于有限元法的耙齿土壤切削仿真[J]. 水运工程, 2015(1): 32-36.
- [6] MCKYES E, DESIR F L. Prediction and field measurements of tillage tool draft forces and efficiency in cohesive soils[J]. Soil and tillage research, 1984, 4(5): 459-470.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第197页)

- [9] 安阳, 晏鄂川, 李兴明, 等. 石膏岩干湿循环细观模拟及损伤本构模型[J]. 地质科技情报, 2019, 38(4): 240-246.
- [10] 宋朝阳, 纪洪广, 刘志强, 等. 干湿循环作用下弱胶结岩石声发射特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(4): 812-819.
- [11] 赵建军, 解明礼, 李涛, 等. 饱水条件下千枚岩软化效应试验分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1449-1454.
- [12] 梁亚飞, 李化敏, 李回贵, 等. 煤层顶板砂岩微观结构及力学特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018,

14(S2): 579-586.

- [13] 胡玉, 邓华锋, 李建林, 等. 水-岩作用下砂岩微观结构变化特性及机理研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(2): 265-273, 281.
- [14] 孙友杰, 戚承志, 朱华挺, 等. 岩石动态断裂过程的能量分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1): 43-49.
- [15] 郭永成, 王克辉, 胡鹏, 等. 砂岩破坏特性与能量耗散的试验研究[J]. 力学与实践, 2019, 41(5): 554-558.

(本文编辑 王璁)