

基于 CFD-DEM 的黏土耙头切削 数值特性研究

焦 鹏,陈 旭

(中港疏浚有限公司,上海 200136)

摘要:硬质黏土挖掘是长期困扰疏浚行业的难题,针对连云港地区硬质黏土疏浚效率低下的问题,采用基于离散元的 流固耦合数值模拟,针对不同黏聚力的黏土疏浚过程,进行黏土耙头切削数值特性研究。结果表明,常规压力高压冲水在 疏浚软黏土时效果较好,在疏浚硬质黏土时无法进入土体,造成耙头切削阻力大、耙头堵塞等一系列问题,在施工硬质黏 土时,应提高高压冲水压力,从而提高疏浚效率。

关键词:黏土; 耙吸式挖泥船; 数值模拟

中图分类号: U616+.2

文献标志码:A

文章编号: 1002-4972(2025)05-0183-07

Numerical study on characteristics of clay cutting of drag head based on CFD-DEM JIAO Peng, CHEN Xu

(CHEC Dredging Co., Ltd., Shanghai 200136, China)

Abstract: The excavation of hard clay has long been a challenging issue in the dredging industry. To address the problem of low dredging efficiency of hard clay in Lianyungang area, this paper employs discrete element-based fluid-solid coupling numerical simulation to study the cutting characteristics of clay grab heads, examining the dredging process for clays with different cohesion levels. The results show that the conventional high-pressure water jets are effective for dredging soft clay, but when dredging hard clay, high-pressure water cannot penetrate the soil, leading to a series of issues such as high cutting resistance and drag head blockage. Therefore, when excavating hard clay, it is necessary to increase the high-pressure water jet pressure to increase dredging efficiency.

Keywords: clay; trailing suction hopper dredger; numerical simulation

我国北方地区黏土分布较为广泛,其中以连 云港地区最为典型。工程地质勘察报告显示某工 程的黏土主要为更新统冲湖积相及冲海积相沉积 物^[1],通过现场取样并进行物理性能指标检测, 黏土黏聚力可达 42 kPa,为典型的硬质黏土。

耙吸挖泥船通用主动耙头主要用于挖掘淤泥、 松散砂性土,高压冲水压力一般在 900 kPa,挖掘 黏土时存在耙头入土困难、拖曳阻力大、黏土堵 耙等问题^[2-3]。 鉴于此,本文针对连云港地区黏土切削进行 数值方法的研究,并基于该数值方法对软黏土及 硬质黏土的挖掘效果进行对比分析。

1 基于疏浚过程的 DEM 建模方法

离散单元法(discrete element method, DEM)将 颗粒集合体分离成离散单元集合,利用牛顿第二 定律建立每个单元的运动方程,利用松弛迭代法 进行计算,在每一步更新单元的位置,并遍历整

收稿日期: 2024-07-26

作者简介: 焦鹏 (1980—), 男, 高级工程师, 从事疏浚机具与工艺优化研究工作。

个单元集合。疏浚过程伴随着冲水、混合吸入等 水流和土壤的相互作用,因此对疏浚过程的研究 涉及岩土力学和流体力学^[45]。

1.1 颗粒形状

本文采用非球形颗粒,即4个相互重叠球形的组合,粒子的非球形特性自然会限制旋转运动, 如图1所示。





1.2 颗粒尺寸

引入一种粗糙颗粒模型,每个模拟的颗粒均 是一个表示多个较小相同颗粒的粒子束。该模型 使用大颗粒替代小颗粒以节省计算资源,但在计 算过程中粒子间的相互作用及粒子与流体的相互 作用均保留了小颗粒的物理特征。

1.3 接触模型

黏土是一种在黏土颗粒之间产生黏结应力并 对其他材料产生黏结应力的材料,内聚力和黏附 力均可恢复。通过一些试算来看,JKR和Bonding 均可模拟出黏土的一次抗剪切强度,而当剪切面 被破坏后,该两种模型表现出完全不同的特性。 从水平剪切力试算表明,JKR模型在剪切力达到 峰值时,随着剪切面积的减小其卸载路径呈现坡 度下降趋势。而Bonding模型在剪切力达到峰值 后,剪切力开始垂直式下降,断裂键完全失去强 度并不可再恢复。本文采用JKR模型进行模拟。

2 黏土离散元颗粒参数标定

DEM 中的材料物性参数主要包括 3 类:本征 参数、基本接触参数、接触模型参数。黏土材料 标定的目的是通过虚拟试验和仿真试验选出能反 应出宏观抗剪切强度特征和附着力特征的 DEM 微 观参数。需要标定的参数为:抗剪切强度特征参 数包括粒子-粒子表面能及静摩擦系数;附着力参 数为粒子-壁面表面能。

2.1 柱状剪切试验

使用 JKR 模型进行柱状剪切试验时,相互接触的颗粒会在接触表面生成表面黏聚力,其大小 是接触模型中表面能量参数的线性函数。由于柱 状剪切试验是在无压力下进行的,因此测得的抗 剪切强度是对标黏土宏观参数中的内聚力。

2.2 直剪试验

直剪试验与柱状剪切试验的不同主要为其在 试样顶部施加一定的压力,根据摩尔-库仑原则, 较大压力作用在剪切面上会产生静摩擦系数乘以 压力的额外抗剪力,在土样实物直剪试验中,测 得土样的内摩擦角为 12.6°。将该参数输入直剪试 验标定模型中进行计算,得到一组不同压力下的 抗剪切强度。

2.3 附着力

根据土样试验,本次取样的硬质黏土的附着 力为38 g/cm²,即3.7 kPa。在DEM 模型中,粒子 材料与几何结构之间的附着力通常使用 JKR 线性 黏聚力模型进行模拟。为了验证附着力的参数, 设计一个附着力标定模型,该模型采用一块薄板 从中间穿过黏土块,黏土的吸附作用会对拉板形 成阻力。通过测量该阻力可得到对应的附着力, 经过多组标定后,得出粒子几何间的 JKR 表面能 与附着力之间的对应关系。

2.4 DEM 模型细观参数

根据试验及标定计算几种典型黏土的 DEM 细 观参数,见表1。

Tab. 1 Mesoscopic parameters in DEM									
	粒子填充参	参数		粒子本征参数					
粒子平均半径/mr	n 粒子半径分布	ī 分布方差 ¹	填充孔隙率	粒子密度/(g·cm	-3) 杨氏	模量/MPa	泊松比		
5	对数正态	0.052	0.60~0.62	2.74		52	0.25		
基本接触参数									
粒子-粒子恢复系数	粒子-几何恢复系数	粒子-粒子静摩擦系数	粒子-几何静摩擦	系数 粒子-粒子	滚动摩擦系数	粒子-几何落	彩动摩擦系数		
0.5	0.5	0.25	0.4	(). 001	0.	001		
JKR 模型参数									
16 kPa 粒子-粒子	32 kPa 粒子-粒子	42 kPa 粒子-粒子	· 2.4 kPa 粒子	子-几何 5.2	kPa 粒子-几何	10 kPa	粒子-几何		
表面能/(N·m ⁻¹)	表面能/(N·m ⁻¹)	表面能/(N·m ⁻¹)) 表面能/(N	·m ⁻¹) 表ī	面能/(N・m⁻¹)	表面能	$(N \cdot m^{-1})$		
150	300	390	100		150	3	300		

表 1 DEM 细观参数 Tab 1 Mesoscopic parameters in DEM

3 黏土切削数值方法验证

物理模型试验采用 1975 年东京大学发表的 Analysis of the Mechanism of Soil Cutting 中的数据^[6]。 该文献分别针对干石英砂和黏塑性土的直线切削 做了大量的试验和分析,具有较高的参考价值。 本文从切削形态、切削力对比、黏土强度应变速 率效应等方面对比试验中的黏塑性土试验结果, 验证数值模型。

3.1 建模信息

文献[6]中数值模型的建模信息见表2。

表 2 对比试验模型参数 Tab. 2 Parameters of comparative experimental model

刀具	刀具	刀具切削	刀具切削		土壤 JKR	土壤静	土块长度/	土块宽度/	土块高度/
宽度/m	长度/m	深度/m	角度/(°)	表	面能/(N·m ⁻¹)	摩擦系数	m	m	m
0.33	0.20	0.10	30-45-60-90		150	0.25	0.8	0.4	0.3

3.2 网格及边界条件

计算模型中的网格有两套,一套为计算域网格,计算域网格底部用来填充粒子用于模拟土块,顶部为空区域作粒子的运动空间。另一套网格为用于模拟刀具的重叠网格,该重叠网格可在计算域网格内运动。

颗粒间以及颗粒与刀具表面接触力建模采用 了 Hertz-Mindlin+JKR 模型,颗粒采用填充法注入, 填充孔隙率 0.62。设置好刀具角度后,将刀具向 下运动,直至达到刀具侵入土中 0.1 m,完成切削 模拟前初始化。初始化完成后,即可为刀具设定 一定的水平速度进行切削模拟。

3.3 切削形态验证

对 0.1 m/s 切削速度下各切削角度的粒子状态 进行剖视后与同等状态下的切削试验进行对比, 得出数值模拟显示的切削形态与试验结果吻合度 较高,图 2 为 45°时的对比情况。



a) 数值模拟





从模拟过程来看,粒子在刀具的作用下,总 是沿着一个剪切面发生相对运动,要产生这个运 动,必须克服粒子在剪切面上由聚合作用产生的 抗剪力。由于刀具的水平移动,粒子会沿着刀具 的表面向上运动,这个运动需克服粒子与刀具表 面吸附而产生的附着力。这意味着离散元数值模 拟方法中切削阻力的产生机制与理论是相符的。

3.4 切削力验证

模拟完成后,提取颗粒与刀具表面之前的总 接触力,即为切削力。总接触力的水平分力方向 为水平切削力,垂直分力为垂直切削力,对3种 切削角度下水平切削力进行提取,可得数值模拟 的切削力水平与试验数据较为吻合,见表3。需要 说明的是,土壤性质极为复杂且均质性较差,试 验结果通常存在较大的误差,对于土壤切削力学 来说,9%和14%的误差应在可接收的范围内。

	表 3	切削力验证
Гаb. З	Valid	lation of cutting force

_			
	切削角度/	文献试验	数值模拟
	(°)	水平切削力/kN	水平切削力/kN
	30	1.040	0. 998
	45	1.136	1. 290
	60	1.799	1. 643
_	90	2. 678	2. 538

3.5 黏土强度应变速率效应验证

为了验证黏土强度的应变速率效应^[7],对45° 切削角度下进行0.1和1.0m/s两种切削速度v_e的 数值模拟,对两种速度下的切削力进行提取并处 理成随切削距离变化的曲线,见图3。由图可知, 开始时随着切削距离的增加,粒子被快速压实, 水平切削力也快速增加。切削稳定后,随着附着在 刀齿表面上的粒子增多,粒子与刀具附着力的增加



a) 全局网格



图 4 网格配置 Fig. 4 Grid configuration

使得总水平切削力缓慢增大。待粒子覆满刀面后, 1.0 m/s下水平切削力相比0.1 m/s增大约15%,数 值模拟的黏土切削力应变速率增强特性与理论相符。





4 黏土耙头切削、冲水及吸入过程数值分析4.1 模型及边界条件

4.1.1 数值模型

使用 1:1 耙头比例进行建模,数值模型包含 固定体、活动罩、冲水耙齿、冲水耐磨块及吸入格 栅等的几何形状和特征。耙头及部分耙管位于长方 体计算域内,计算域长 33 m,宽 11 m,高 8 m,计 算域底部设一梯形凹坑用作土壤区域。

4.1.2 网格设置

网格类型为切割体网格^[8-10],考虑到耙头模拟 时需要相对计算域移动,模拟采用重叠网格技术。 背景网格为计算域,前景网格为耙头区域,耙头几 何模型周围设有包裹其外形的重叠区域,重叠边界 与耙头壁面之间至少保证5层网格用于交换数据。 如图4所示,网格采用多层局部加密,耙头耙管前 景区域及其运动范围内的背景区域都进行网格加密 处理,耙头切削齿及冲水口区域额外再进行一次加 密处理,体网格数量500万,面网格1480万。



c) 重叠区域网格

4.1.3 边界条件

耙头置于计算域内,其中部分耙管露出计算 域,耙管端部设为速度出口,用以控制整个耙吸 管系的吸入流量,耙吸管系管壁及耙头内轮廓几 何特征均为壁面条件。耐磨块、耙齿及转轴上设 有冲水孔,设置速度进口边界,用以模拟冲水。 冲水孔区域网格加密。耙头及耙管采用重叠区域 包裹,重叠区域外侧设为重叠表面,并使用替代 孔切削形成重叠网格界面。

4.1.4 物理模型

黏土耦合作用下,切削模拟采用上述几何模型和边界设置,黏土采用 DEM 颗粒进行模拟,主 要模拟参数见表4。

表 4 黏土物理模型参数 Tab. 4 Physical model parameters of clay

颗粒	颗粒	颗粒计数/		 软黏土					流固耦合
类型	直径/mm	万个	颗粒-颗粒表	表面能/(N・m	n ⁻¹) 颗	粒-壁面表面能/(N•m ⁻¹) $(g \cdot cm^{-3})$	模量/MPa	形式
球形颗粒	5	290		200		100	2.74	20	双向耦合
	耙	已头切削	计算域水流	冲水速度/	耙管出口		硬质黏土		
柄百刀石	速度 速度	$E/(m \cdot s^{-1})$	速度/(m·s ⁻¹)	$(m\boldsymbol{\cdot} s^{-1})$	速度/(m·s ⁻¹) 颗粒-颗粒表面能/((N·m ⁻¹) 颗粒	-壁面表面能	$/(N \cdot m^{-1})$
压力梯度+	曳力	1.0	2.0	20.0	5.5	400		150	

4.2 耦合切削模拟结果

4.2.1 软黏土模拟结果

图 5 显示了黏土在冲水和吸入联合作用下的切削 过程,耙头切削长度 2.3 m。开始切削时,土层在耙 齿的作用下被剥离,在冲水的作用下耐磨块到耙齿段 的土层被侵蚀变得松软。耙齿切削力先增大后减小, 表明冲水对于软黏土起到了液化作用。另外,由图可 以看出黏土在格栅局部因自身黏性产生了小块堆积, 但活动罩转轴冲水将大部分黏土推离活动罩后端,避 免黏土黏聚在活动罩上,如图6所示。



a) 求解时间2.1 s

b) 求解时间3.4 s

图 5 软黏土在冲水和吸入联合作用下的切削过程 Fig. 5 Cutting process of soft clay under combined effects of jet and suction



a) 无冲水





图 6 冲水效果 Fig. 6 Jet effects

4.2.2 硬质黏土模拟结果

图 7 显示了硬质黏土在冲水和吸入联合作用 下的切削过程,由图可知,相较于软黏土,硬质 黏土破土时间明显增长,耙头最大水平切削力也 由 45 kN 提升至 100 kN,而黏土切削量却减少 明显。

当黏土强度大于冲水对土层造成的冲击压力 后,冲水的冲刷效果将会大幅度降低。当冲水水 流触及到硬质黏土层时没有对黏土产生明显的破 坏,水流在黏土层表面发生了偏转,如图 8 所示。





图 8 冲水作用在硬质黏土层的效果 Fig. 8 Effects of jet on hard clay layer

4.2.3 两种黏土模拟结果分析

相比软黏土,冲水等流体对硬质黏土影响更小,因冲水导致的稀释、混合效应不明显。被切



a) 硬质黏土

削起的黏土块发生了膨胀和变形但还保持较大的 块状,使得耙头及耙管内混合物的均匀性不太好, 模拟情况见图 9。





图 9 两种黏土的混合物分布 Fig. 9 Mixture distribution of two kinds of clay

5 结语

 1)采用 DEM 法构建黏土颗粒时,颗粒形状 可采用4个相互重叠球形限制旋转,接触模型采 用 JKR 模型进行标定。

2)颗粒间以及颗粒与刀具表面接触力建模采用Hertz-Mindlin+JKR模型,颗粒采用填充法注入 且填充孔隙率为 0.62,JKR表面能为 150 N/m,数值模拟结果与试验数据吻合较好。

3)在切削软黏土过程中,常规压力高压冲水 能够进入土体并液化土体。同时,活动罩转轴冲 水可将大部分黏土推离活动罩后端,避免黏土 黏聚。

4) 在切削硬质黏土过程中,高压冲水没有对 黏土产生明显的破坏,水流在黏土层表面发生偏转。因此,在硬质黏土施工时,应尽可能提高高 压冲水压力,或设计制造高压冲水压力更高的耙 头用于施工。

参考文献:

[1] 尹崧宇,徐继涛,张更生.连云港港 30 万吨级航道二期
 工程难挖地段的土层特性[J].水运工程,2018(S1):
 58-61.

YIN S Y, XU J T, ZHANG G S. Characteristics of soil layers in difficult excavation area in phaseIIdredging project of the 300, 000 tons waterway in Lianyungang Port[J]. Port & waterway engineering, 2018(S1): 58-61.

- [2] 何新伟, 杜志轩. 大型耙吸船在黏性土质条件下的施工[J]. 水运工程, 2020(6): 199-203.
 HE X W, DU Z X. Construction of mega TSHD in cohesive soil[J]. Port & waterway engineering, 2020(6): 199-203.
- [3] 郑金龙,石启正,陈旭,等."新海牛"轮挖掘硬质黏土
 高压冲水耙头系统研制[J].水运工程,2021(11):
 218-222.

ZHENG J L, SHI Q Z, CHEN X, et al. Development of highpressure flushing drag head system for hard clay excavation of "Xinhainiu" trailing suction hopper dredger[J]. Port & waterway engineering, 2021(11): 218-222. [4] 周游,陈根发,陈明洪,等.全耦合 CFD-DEM 颗粒水力 输送模型及其在倾斜管中的应用[J].清华大学学报 (自然科学版),2024,64(11):1987-1996.
ZHOU Y, CHEN G F, CHEN M H, et al. Fully coupled

CFD-DEM model for hydraulic transport of dense particles and its application in inclined pipe[J]. Journal of tsinghua university (science and technology), 2024, 64 (11): 1987-1996.

[5] 蔡国庆, 刁显锋, 杨芮, 等. 基于 CFD-DEM 的流-固耦合 数值建模方法研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(1): 17-32.

CAI G Q, DIAO X F, YANG R, et al. Research progress of fluid-solid coupling model based on CFD-DEM coupling[J].
Journal of Harbin institute of technology, 2024, 56(1): 17-32.

- [6] HATAMURA Y, CHIJIWA K. Analysis of the mechanism of soil cutting: 2nd report, deformation and internal stress of soil in cutting[J]. Transactions of the Japan society of mechanical engineers, 1975, 41(349): 2749-2759.
- [7] MIEDEMA S. Dredging processes: the cutting of sand, clay & rock theory [M]. Delft: Technische Universiteit Delft, 2013.
- [8] 谭礼斌,黄灿,余千英,等.基于 STARCCM+的通机整 机流场特性分析[J].装备制造技术,2018(4):1-7,17. TAN L B, HUANG C, YU Q Y, et al. Flow field characteristics analysis of general purpose engine using STARCCM [J]. Equipment manufacturing technology, 2018(4):1-7,17.
- [9] 李睿. 基于 CFD 的动力电池 pack 热仿真分析与研究[D].沈阳: 沈阳理工大学, 2023.

LI R. Thermal aimulation analysis and research of power battery pack based on CFD [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2023.

[10] 祖洁. 球阀流固耦合仿真分析[J]. 阀门, 2024(4): 476-480.

ZU J. Simulation analysis of fluid-structure coupling of ball valve [J]. Chinese journal of valve, 2024 (4): 476-480.

(本文编辑 王传瑜)