

# 履齿高度对集矿机牵引性能的影响及参数确定

许 焰<sup>1</sup>, 吴鸿云<sup>2,3\*</sup>, 左立标<sup>3</sup>

(1. 长沙学院机电工程系, 长沙 410003; 2. 中南大学资源与安全学院, 长沙 410083;  
3. 长沙矿山研究院有限责任公司海洋所, 长沙 410012)

**摘要:** 为研究履齿高度对集矿机在多金属结核矿区稀软底质上的牵引性能的影响, 并确定履齿高度, 以优化集矿机的行走机构。该文基于稀软底质的剪切位移和应力模型, 构建了单履带板、齿与稀软底质的驱动力模型和集矿机的附着力学模型, 研究了履齿高度参数对集矿机在稀软底质上的牵引性能的影响。结果表明, 履齿高度能提高集矿机在稀软底质上的牵引性能: 集矿机在稀软底上产生的驱动力随履齿高度增加而快速增加; 附着力在齿高小于 15 cm 时随齿高增加快速增加, 齿高大于 15 cm 后趋缓。集矿机的齿高应不大于 15 cm。

**关键词:** 工程装备, 黏附, 驱动, 集矿机, 稀软底质, 牵引性能, 履齿高度

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.11.012

中图分类号: TH12, TD98

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-11-0068-07

许 焰, 吴鸿云, 左立标. 履齿高度对集矿机牵引性能的影响及参数确定[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 68-74.  
Xu Yan, Wu Hongyun, Zuo Libiao. Influence of shoe tooth height of tracked vehicle on traction performance and its parameter determination[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 68-74. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

始于 20 世纪 60 年代的大洋多金属结核资源的研究与开发, 经过 30 多年的发展, 其采矿技术日趋成熟, 基于“集矿机+水力提升输送”的采矿方法较具经济性和可行性<sup>[1-3]</sup>。

我国于 1999 年完成了大洋多金属结核矿产资源研究开发中试采矿系统的总体设计, 确定了我国多金属结核采矿系统为“自行式集矿机—水力管道提升—水面船”组成的采矿系统, 该系统于 2001 年成功地进行了 130 m 水深湖试。

多金属结核矿区海底表层稀软底质的抗剪性能差, 易液化, 承载能力弱<sup>[4-6]</sup>, 陆地履带车辆因接地压力大和低齿结构, 在海底作业时易沉陷并因驱动力不足而原地打滑。集矿机<sup>[7-10]</sup>作为一种自行式履带车, 具备海底行走和采集功能, 采用高齿行走履带, 能显著提高其海底牵引性能。

Schwarz<sup>[11]</sup>、Sup Hong<sup>[12]</sup>和李力等<sup>[13-14]</sup>针对多金属结核矿区稀软底质的物理力学特性, 在实验室进行了模拟稀软底质的土槽剪切试验, 建立了稀软底质的剪切模型, 基于试验数据获得了不同履齿高度下的牵引力, 但

未能在理论上给予出履齿高度与牵引力的力学模型以及履齿高度对牵引力的定性描述。姬长英等<sup>[15-17]</sup>运用错位理论研究了湿软土壤的剪切变形机理, 并建立了湿软土壤的“剪切应力—剪切速度—时间”数学模型, 推导了单块履带板和履带车辆产生的推力学模型, 并经试验进行了验证, 该湿软土壤物理力学特性不同于深海稀软底质, 因而其力学模型不一定适宜于深海稀软底质。

论文在前期试验和相关理论的基础上, 建立集矿机的牵引力学模型, 理论研究履齿高度对集矿机牵引性能的影响, 并从附着力方面定量获得集矿机履齿高度, 为集矿机的优化设计提供理论依据。

## 1 底质的剪切应力—位移模型

### 1.1 集矿机

集矿机用于采集海底沉积物中的结核并进行初处理, 在除去大结核的同时将合格尺寸的结核输入水力管道提升系统中的扬矿管底端, 以水力或气力提升方法使管内的水以足够的速度向上运动, 将结核输送到水面采矿船上。

集矿机采用履带行走方式, 产生的牵引力大, 压陷深度浅, 具有较好的灵活性、避障能力、较高的采矿效率、开采规模大、技术难度小等优点。如图 1 所示, 集矿机主要由行走机构、集矿头、破碎机、液压站以及电子仓、传感器和仪表、破碎机、动力分配箱和接头、输送软管及附件、浮力构件和测控元器件等部分组成。行走机构采用三角形高齿履带、半浮动悬挂、变量泵双液压马达双链条单独驱动, 集矿头利用水射流冲击底板反射使结核上扬, 并在附壁射流产生的负压下被输送到破碎机的进料口, 通过四连杆平行机构与行走机构连接, 由油缸调节高度和倾角, 破碎机采用单齿辊式。液压系统的泵、电机、阀组均

收稿日期: 2011-12-15 修订日期: 2012-01-29

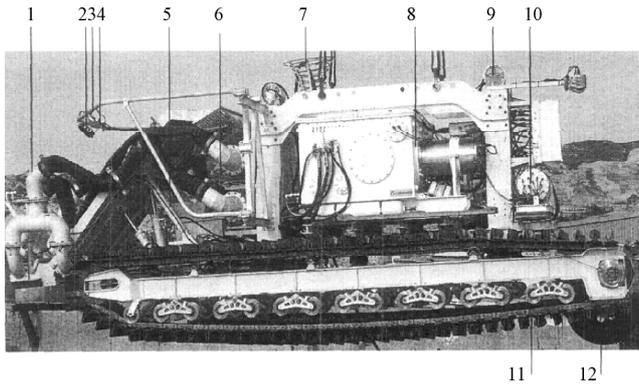
基金项目: 国家“十一五”大洋专项: 稀软沉积物上的车辆技术研究 (DYXM-115-04-02-03); 湖南省“十二五”重点建设学科资助项目”。

作者简介: 许 焰 (1976—), 男 (汉族), 湖南长沙人, 博士, 副教授, 主要从事深海设备设计方面的研究。长沙 长沙学院机电工程系, 410003。

Email: x\_y616@163.com

\*通信作者: 吴鸿云, (1976—), 男 (汉族), 湖北洪湖人, 中南大学力学博士后, 主要从事深海采矿和勘探装备研究与开发方面的研究。长沙 长沙矿山研究院有限责任公司海洋所, 410012。Email: hongyun\_wu76@163.com

装在耐压仓内，预压进行水压平衡补偿。



1.集矿头 2.测障声纳 3.摄像头 4.照明灯 5.支承连接装置 6.破碎机  
7.输送软管 8.液压站 9.着地平衡装置 10.电子仓 11.履带行走机构  
12.地轮

图 1 集矿机结构示意图

Fig.1 Principle chart of seabed tracked vehicle

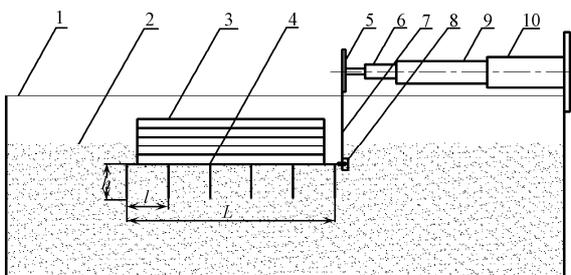
根据现场测试和实验室取样测试结果，深海稀软底质抗剪性能差，表层稀软底质（0~20 cm）的最大抗剪强度约为 5 kPa。集矿机在海底作业过程中，行走履带剪切稀软底质，稀软底质则驱动行走履带前进。对于表征为内聚性土壤的深海稀软底质，集矿机履齿的高度对提高集矿机在稀软底质上产生的驱动力则显得尤为重要。

此外，稀软底质表层易液化，承载能力弱，集矿机行驶过程中压陷底质，底质则阻碍集矿机前进，降低集矿机的牵引力。集矿机在稀软底质上的压陷深度由集矿机的接地压力决定，因而合理设计集矿机的接地压力，进而有效控制集矿机压陷深度，提高集矿机在深海稀软底质上的牵引性能。

### 1.2 深海稀软底质的剪切应力—位移模型

为预测集矿机在稀软底质上行驶产生的牵引力，需了解深海稀软底质的剪切应力和剪切变形之间的关系。这个关系通常采用剪切试验确定。

如图 2 所示，试验在土槽中进行，土槽内铺设一定深度的模拟底质，履带板底部等间距排列一定数量的履齿，按一定的接地压力在履带板上加载配重块，履带板压陷模拟底质，固定在试验土槽上的油缸牵引拉杆带动履带板和履齿剪切底质，通过液压油缸的位移和传感器的压力建立底质的剪切应力—剪切位移关系。



1.土槽 2.模拟底质 3.配重块 4.剪切板 5.法兰 6.传感器 7.拉杆  
8.拉环 9.活塞 10.液压油缸

图 2 剪切测试原理图

Fig.2 Principle chart of shearing test

如图 3 所示，为模拟底质在 1.0、3.5 和 5.0 kPa 的接地压力下的剪切应力与剪切位移的曲线关系图。

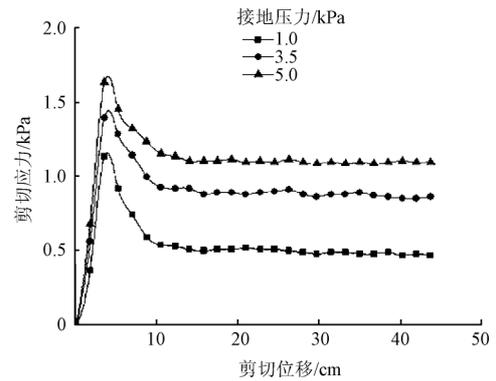


图 3 50 cm × 20 cm 剪切板剪切测试曲线

Fig.3 Shearing test curve of 50 cm×20 cm shearing board

由图 3 可知，稀软底质的剪切应力与剪切位移关系具有脆性土的典型特性：剪切应力均随剪切位移的增加而迅速增加，增加至峰值后快速下降，然后缓慢降低至稳定的残余剪应力。

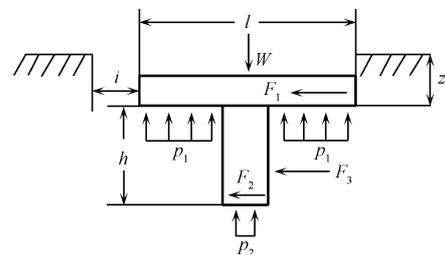
稀软底质剪切应力—剪切位移模型，是基于剪切模量( $k_m$ )的拐点特征、最大剪切应力( $\tau_{max}$ )和残余剪应力( $\tau_{rest}$ )值区间特征和  $e^{1-j/k_m}$ 、 $e^{-j/k_m}$  的曲线变化特征的数学模型，具体关系式如下<sup>[18]</sup>。

$$\tau(j) = \tau_{max}(\lambda + \omega e^{-j/k_m})(1 - e^{-j/k_m}) \quad (1)$$

式中， $j$  为剪切位移，cm； $\tau(j)$  为对应  $j$  位移处的剪切强度，kPa； $\tau_{max}$  为最大剪切应力，kPa； $k_m$  为剪切模量，即最大剪应力对应的剪切位移，cm； $\lambda$  为小于 1 的比例系数； $\omega = e/[e/(e-1) - \lambda]$ 。

## 2 单履带板、齿剪切稀软底质产生的推力

如图 4，为单履带板、齿的剪切试验原理图。履齿固定在履带板正下方，履带板在载荷作用下下陷一定深度，水平牵引履带板和履齿，履带板和履齿在牵引的过程中受到底质的作用力。



注： $l$  为履带板长； $h$  为履齿齿高； $W$  为履带板所承载荷； $z$  为履带板在载荷作用下下陷深度； $F_1$  为底质施加给履带板底部的作用力； $F_2$  为底质施加给履齿齿顶表面的作用力； $F_3$  为底质作用于履齿、履带板两侧的推力； $p_1$ 、 $p_2$  为履带板和履齿在载荷作用下，下陷至一定深度后受到底质的应力。

图 4 单履带板、齿剪切底质原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of one track and shoe shearing sediments

### 2.1 底质施加给履带板和齿顶表面的作用力

假定履齿截面光滑，则履带板、履齿在垂直方向受

力平衡。

$$W = p_1(l-k)B + p_2kB \quad (2)$$

式中,  $W$  为履带作用载荷, KN;  $p_1$ 、 $p_2$  为履带板和履齿在载荷作用下, 下陷至一定深度后受到底质的应力, kPa;  $l$  为履带板长, m;  $B$  为载荷面的短边(或矩形板的宽度), m;  $k$  为齿厚, m。

根据贝克的压力沉陷公式,  $p_1$ 、 $p_2$  分别可从下式计算

$$\begin{cases} p_1 = (k_c / B + k_\phi) z^n \\ p_2 = (k_c / B + k_\phi) (z + h)^n \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $z$  为沉陷量, m;  $h$  为齿高, m;  $n$  为变形指数, 无量纲;  $k_c$  为土体的内聚变形模量;  $k_\phi$  为土体的摩擦变形模量。

$k_c$ 、 $k_\phi$  和  $n$  的值可以从具有不同宽度的 2 个平板的 2 个试验中得到。

作用于履带板和履齿底部的力可通过下式计算

$$F = B \int_0^L \tau(x) dx \quad (4)$$

式中,  $\tau(x)$  为土体的剪切应力随剪切位移变化的函数式;  $L$  为履带板的剪切长度, m。

根据稀软底质剪切应力—剪切位移模型, 单履带板、齿在剪切底质过程中受到底质的作用力  $F_1$ 、 $F_2$  为

$$\begin{cases} F_1 = B \int_0^{(l-k)} [\tau_{\max 1} (\lambda + \omega e^{-j/k_m}) (1 - e^{-j/k_m})] dx \\ F_2 = B \int_0^k [\tau_{\max 2} (\lambda + \omega e^{-j/k_m}) (1 - e^{-j/k_m})] dx \end{cases} \quad (5)$$

根据库仑定律有

$$\tau_{\max} = C + \sigma \tan \phi \quad (6)$$

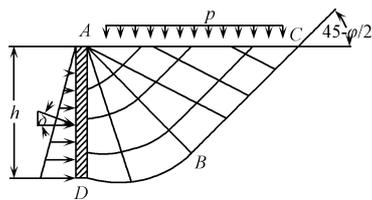
式中,  $C$  为土的内聚力, kPa;  $\phi$  为土的内摩擦角, °;  $\sigma$  为接地压力, kPa。

用  $ix$  ( $i$  表示纵向滑移,  $x$  表示单履带板的纵向位置) 代替式 (5) 中的  $j$ , 有

$$\begin{cases} F_1 = B(l-k)[C + \tan \phi (k_c / B + k_\phi) z_0^n] (\lambda + \omega e^{-ix/k_m}) (1 - e^{-ix/k_m}) \\ F_2 = Bk[C + \tan \phi (k_c / B + k_\phi) (z_0 + h)^n] (\lambda + \omega e^{-ix/k_m}) (1 - e^{-ix/k_m}) \end{cases} \quad (7)$$

## 2.2 底质垂直作用于履齿剪切面的作用力

由于履齿与土壤间有摩擦和黏附存在, 但靠近履齿的土壤处于塑性平衡状态时, 在土壤-履齿接触面上将产生剪应力。土壤土体的破坏图形如图 5 所示。



注:  $p$  为附加载荷, 可视为平均接地压力;  $h$  为履齿齿高;  $\delta$  为土壤与履带板、齿摩擦角;  $\phi$  为土壤内抗剪强度角, 即内摩擦角

图 5 履齿前方土壤的破坏模型

Fig.5 Damage model of soil in front of track shoe

该土体在  $ABC$  区域内处于 Rankine 被动状态, 用于

水平线成  $45^\circ + \phi/2$  的直滑移线来表示。  $ABD$  区域紧靠履齿, 用曲线和径向滑移线表示, 通常叫做径向剪切带。这个弯曲的滑移线的形状, 如图 5 所示的  $BD$ , 可以是对数螺旋线(对于摩擦材料), 或者是圆弧(对于黏性材料), 是相当精确的。如图 5 所示, 作用在垂直履齿上被动土压的应力, 在  $A$  点以下可以近似应用下述线性方程来表示<sup>[19-20]</sup>

$$\sigma = \gamma_s z K_{pr} + p K_{pq} + C K_{pc} \quad (8)$$

式中,  $\sigma$  为垂直履齿上被动土压的应力, kPa;  $p$  为附加载荷, 可视为平均接地压力, kPa;  $K_{pr}$ 、 $K_{pq}$  和  $K_{pc}$  为常数, 见式 (9);  $\delta$  为土壤与履带板、齿摩擦角, (°);  $\phi$  为土壤内抗剪强度角, 即内摩擦角, (°);  $\gamma_s$  为土壤密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\beta$  为  $\arctan(h/B)$ , (°)。

$$\begin{cases} K_{pr} = \frac{3 \tan \beta + 2h/B}{6[\cot(\beta + \phi) - \tan \delta] \tan^2 \beta} \\ K_{pq} = \frac{\tan \beta + h/B}{[\cot(\beta + \phi) - \tan \delta] \tan^2 \beta} \\ K_{pc} = \frac{[1 + \cot \beta \cot(\beta + \phi)](h/B + \tan \beta)}{[\cot(\beta + \phi) - \tan \delta] \tan^2 \beta} \end{cases} \quad (9)$$

垂直于履齿剪切面的作用力  $F_0$  为

$$\begin{aligned} F_0 &= B \int_0^h (\gamma_s z K_{pr} + p K_{pq} + C K_{pc}) dh \\ &= \frac{1}{2} \gamma_s h^2 B K_{pr} + p h B K_{pq} + C h B K_{pc} \end{aligned} \quad (10)$$

## 2.3 底质作用于履带板、齿两端的力

履齿在剪切底质的过程中, 履齿和履带板要与其两侧的底质发生相对运动。

履带作用在底质上的载荷可以看作是作用在半无限体上的带状载荷, 由于在一定载荷作用下弹性体内的应力分布与黏弹的应力分布相同, 因此可按底质为弹性体求底质的内应力分布。根据弹性力学, 在载荷为  $p$  的带状载荷的作用下, 半无限体内任一点上  $x$  方向(垂直于带状载荷)上的应力为

$$\sigma_x = -\frac{p}{2\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta = -\frac{p}{2\pi} (2\theta - \sin 2\theta) \Big|_{\theta_1}^{\theta_2} \quad (11)$$

上式中  $\theta_1$  和  $\theta_2$  为带状载荷作用下  $H$  深度处的任一点与作用板的夹角, (°),  $\theta$  为带状载荷作用下  $H$  处的点与作用板的夹角, (°),  $H$  为作用深度。

在  $\theta_1=0$  处, 半无限体内任一点上  $x$  方向上的应力

$$\sigma_x = -\frac{p}{2\pi} (2\theta_2 - \sin 2\theta_2) = -\frac{p}{2\pi} (\pi - 2\theta - \sin 2\theta) \quad (12)$$

从表面到深度为  $h$ , 垂直于带状载荷带的应力之和为

$$F_x = -\frac{pl}{2\pi} \int_0^h (\pi - 2\theta - \sin 2\theta) dH \quad (13)$$

又

$$\frac{H}{B} = \tan \theta$$

因而

$$F_x = -\frac{pBl}{2\pi} \int_0^{\theta_0} (\pi - 2\theta - \sin 2\theta) \frac{1}{\cos^2 \theta} d\theta \quad (14)$$

$$= -pBl \left( \frac{1}{2} \tan \theta_0 - \frac{\theta_0}{\pi} \tan \theta_0 \right)$$

又

$$\frac{h}{B} = \tan \theta_0$$

式中， $\theta_0$  为对应深度  $h$  处的夹角， $(^\circ)$ 。

则作用于履带板、齿两侧的力为

$$F_x = \frac{phl}{\pi} \arctan(h/B) \quad (15)$$

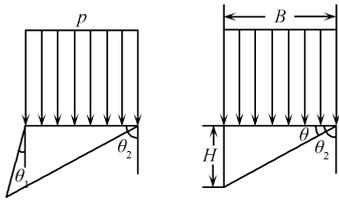
带状载荷为接地压力，即

$$p = p_0 = \frac{G}{Bl}$$

式中， $p_0$  为平均接地压力，kPa； $G$  为作用于带状板的作用力，集矿机模型则为集矿机的水中重量，N。

则式 (14) 化为

$$F_x = \frac{Ghl}{BL\pi} \arctan(h/B) = \frac{G}{\pi} (h/B) \arctan(h/B) \quad (16)$$



注： $\theta_1$ ， $\theta_2$  为带状载荷作用下  $H$  深度处的任一点与作用板的夹角， $H$  为作用深度； $p$  为作用载荷； $B$  为作用板宽

图 6 带状载荷作用下底质的应力分布

Fig.6 Stress distribution of sediments under strip load

### 2.4 单履带板、齿剪切底质产生的总驱动力

单履带板、齿剪切底质产生的驱动力为底质施加给履带板底部的作用力、底质施加给履齿齿顶表面的作用力、底质施加给履齿剪切面的作用力和底质作用于履带板、齿两侧的力的合力，即

$$F = F_0 + F_1 + F_2 + F_x$$

单履带板、齿剪切底质产生的总驱动力

$$F = \frac{1}{2} \gamma_s h^2 BK_{pr} + phBK_{pq} + ChBK_{pc} + \frac{G}{\pi} (h/B) \arctan(h/B) + Bl \left\{ C + \tan \varphi (k_c / B + k_\phi) \left[ (l-k)z_0^n + k(z_0+h)^n \right] \right\} \cdot (\lambda + \omega e^{-i/k_m}) (1 - e^{-i/k_m}) \quad (17)$$

式中， $z_0$  为最大压陷。

根据式 (17)，最大推力

$$F = \frac{1}{2} \gamma_s h^2 BK_{pr} + phBK_{pq} + ChBK_{pc} + \frac{G}{\pi} (h/B) \arctan(h/B) + Bl \left\{ C + \tan \varphi (k_c / B + k_\phi) \left[ (l-k)z_0^n + k(z_0+h)^n \right] \right\} \frac{(w+\lambda)^2}{4w} \quad (18)$$

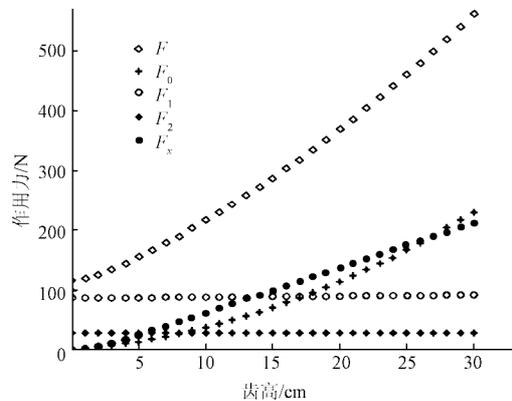
集矿机在稀软底质上行走作业时，其履带行走机构与稀软底质相互作用：履带行走机构剪切稀软底质，稀软底质反过来驱动履带行走机构前进。因集矿机的行走机构为履带板与高齿、多齿结构，集矿机在稀软底质上作业产生的驱动力可简化为多单履带板、齿剪切稀软底质的作用合力模型。

为计算履齿参数对推力的影响，将集矿机的结构参数和底质的力学参数（见表 1）代入式 (18) 中，获得剪切过程中履带板、齿受到底质的作用力随履齿高度变化规律。结果如图 7 所示。

表 1 履齿结构及底质力学参数

Table 1 Parameter of track shoe and mechanics of seabed soft sediments

参数	取值
履齿间距( $l$ )/cm	18
履齿宽度( $B$ )/cm	30
履齿厚度( $k$ )/cm	4.5
底质的抗剪强度( $C$ )/kPa	3
底质的内摩擦角( $\varphi$ )/ $(^\circ)$	6.5
接地压力( $p$ )/kPa	5
底质的内聚变形模量( $k_c$ )	0.15
底质的摩擦变形模量( $k_\phi$ )	0.04
底质的变形指数( $n$ )	1
底质的比重( $\gamma_s$ )/(kN·m <sup>-3</sup> )	12
底质与履带板、齿摩擦角( $\delta$ )/ $(^\circ)$	10



注： $F_0$  为垂直作用于履齿剪切面的作用力； $F_1$  为底质施加给履带板底部的作用力； $F_2$  为底质施加给履齿齿顶表面的作用力； $F_x$  为作用于履齿、履带板两侧的力； $F$  为总推力

图 7 履齿高度对推力影响曲线

Fig.7 Curve of influence of height of track shoe on traction

根据图 7，在履齿高度范围内（0~30 cm）内，底质施加给履齿齿顶表面的作用力  $F_2$ 、垂直作用于履齿剪切面的作用力  $F_0$ 、作用于履齿、履带板两侧的力  $F_x$  和总推力  $F$  都随履齿高度的增加而增加，而底质施加给履带板底部的作用力  $F_1$  则随履齿高度的增加而减小。其中，履齿高度对底质作用于履齿齿顶表面、履带板底部的作用力  $F_2$ 、 $F_1$  影响小，最大总推力  $F$  随履齿高度快速增加。

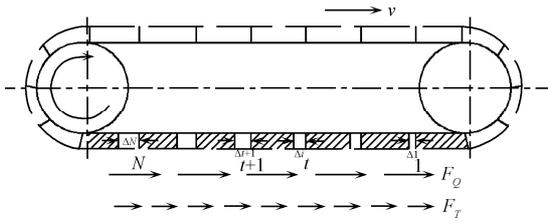
根据设计, 集矿机的行走履带为高齿、多齿结构, 因而, 履齿高度能大幅提高集矿机在稀软底质上产生的驱动力。

### 3 履齿高度对集矿机附着力影响

设履带接地区段在地面上所承受的牵引力为  $F$ , 根据图 8 可以建立单履带产生的牵引力方程

$$F = F_T + F_Q \quad (19)$$

式中,  $F_T$  为履带接地区段与地面之间的摩擦力, kN;  $F_Q$  为土壤对嵌入地面内的履齿所作用的水平反作用力, kN。



注:  $v$  为行驶速度;  $N$  为履齿数;  $F_T$  为履带接地区段与地面之间的摩擦力;  $F_Q$  为土壤对嵌入地面内的履齿所作用的水平反作用力;  $\Delta_N$  为履齿单位剪位移量, 即由于每个履齿离开地面时引起的嵌入土壤内的全部履齿对土壤的平均压缩位移量;  $\Delta_i$  为第  $i$  块履齿的剪切位移量

图 8 集矿机行驶过程中履带接地区段的受力状态

Fig.8 Stress state of the grounding track plate of seabed tracked vehicle when working

履带车辆在地面破坏前的极限状态下所能产生的最大牵引力  $F_{\max}$ , 称为附着力<sup>[21-23]</sup>。集矿机的附着力简化模型为

$$F_{\max} = f_1 + F_C + F_\phi + F_{Q2\max} \quad (20)$$

其中:

$$\begin{cases} f_1 = Gu_0 \\ F_C = \frac{(N+1)CG}{2p_0N\left(1+\frac{C}{ch}\right)} \\ F_\phi = \frac{G(N+1)\tan\phi}{2N\left(1+\frac{C}{ch}\right)} \\ F_{Q2\max} = B(C+p_0\tan\phi) \\ \left[ \lambda L + \frac{(\omega-2\lambda)k_m}{2} + \frac{\omega k_m}{2} e^{-2L/k_m} - (\omega-\lambda)k_m e^{-L/k_m} \right] \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $u_0$  为履带板与地面之间的摩擦系数;  $N$  为履齿数量;  $c$  为底质的抗沉陷系数或抗压系数,  $\text{kN/m}^3$ 。

将相关参数代入上式, 有

$$\begin{cases} f_1 = 0.1G \\ F_C = 0.24G \\ F_\phi = 0.05G \\ F_{Q2\max} = 0.2G \\ F_{\max} = 0.59G \end{cases}$$

集矿机的附着力由 4 项作用力组成: 驱动力  $F_{Q2\max}$ 、底质内聚作用力  $F_C$ 、集矿机与底质的摩擦阻力  $f_1$  和底质

的内摩擦作用力  $F_\phi$ 。集矿机的附着力为其水下质量的 0.59 倍, 其中,  $F_C$  约占附着力的 40.6%, 对集矿机的附着力的影响最大, 其次为驱动力  $F_{Q2\max}$ , 约占附着力的 33.8%,  $f_1$  和  $F_\phi$  对集矿机的附着力的影响可忽略。

根据式 (21),  $F_{Q2\max}$  与齿高  $h$  无关, 为研究齿高  $h$  对集矿机附着性能的影响, 需研究齿高  $h$  对  $F_C$  的影响。根据  $F_C$  的计算式, 以齿高  $h$  为自变量, 以  $F_C$  为因变量, 绘出齿高  $h$  与  $F_C$  的变化关系曲线。如图 9 所示。图 9 中, 横坐标为齿高  $h$ , 纵坐标为  $F_C$  与集矿机水下质量  $G$  的比值  $F_C/G$ 。

根据图 9,  $F_C/G$  的值随齿高  $h$  的增加而增加: 齿高在 0~15 cm 时,  $F_C/G$  的值随齿高  $h$  的增加快速增加, 此时增加履齿的高度可显著提高集矿机的附着性能; 齿高在 15~30 cm 时,  $F_C/G$  的值随齿高  $h$  的增加缓慢增加, 并趋于稳定, 此时再增加履齿的高度, 因履带板表面的几何形状、表面粗糙、加载时间及稀软底质的粘聚性特性, 将导致履带板、齿间黏附一定数量的稀软底质, 致使集矿机的附加重量和接地压力增加<sup>[24-25]</sup>, 集矿机行驶时所受到的土壤水平变形阻力增加, 降低了集矿机的牵引性能。

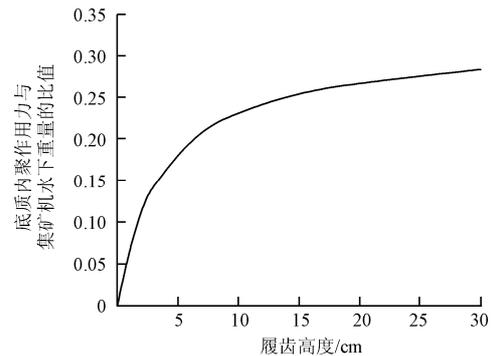


图 9 履齿高度  $h$  对底质内聚作用力与重量的比值 ( $F_C/G$ ) 的影响  
Fig.9 Influence of height of track shoe on  $F_C/G$

鉴此, 集矿机的履齿高度应不大于 15 cm。

## 4 结论

1) 履齿高度提高集矿机在稀软底质上产生的驱动力: 集矿机剪切底质所产生的总驱动力为履齿齿顶及履带板底部、表面的作用力、履齿面及履带板、齿侧面的垂直作用力的合力, 其大小随履齿高度的增加而快速增加。

2) 履齿高度提高集矿机在稀软底质上的附着力: 齿高在 0~15 cm 时, 附着力随齿高的增加快速增加; 齿高在 15~30 cm 时, 附着力随齿高的增加缓慢增加, 并趋于稳定。

3) 综合履齿高度对集矿机在稀软底质上的驱动力和附着力的影响, 集矿机的履齿高度应不大于 15 cm。

### [参考文献]

- [1] Peter A. Rona. Resources of the Sea Floor[J]. Science, 2003, 299: 673-374.

- [2] Anthony T.Jones. Trends in deep seabed mining technology[J]. *The Journal of Offshore Technology*, 2003, 11: 37—40.
- [3] Chung J S. Advances in the manganese nodule mining technology[J]. *J Marine Technology, MTS*, 1985, 19(4): 39—44.
- [4] 宋连清. 大洋多金属结核矿区沉积物土工性质[J]. *海洋学报*, 1999, 6(21): 47—54.  
Song Lianqing. The physical properties of surface sediments in oceanic polymetallic nodule[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 6(21): 47—54. (in Chinese with English abstract)
- [5] 高宇清. 《深海底沉积物土力学特性参数原位测量与测试系统开发》研究报告[R]. 长沙: 长沙矿山研究院, 1999.  
Gao Yuqing. Research and development of in-situ test system of the characteristics of physical mechanics of seabed soft sediments[R]. Changsha: Changsha Institute of Mining Research, 1999. (in Chinese with English abstract)
- [6] Wu Hongyun, Chen Xinming, Gao Yuqing, et al. Research on in-situ shearing strength and penetration resistance testing of the soft seabed sediments in the eastern part of the pacific ocean[A]//Proc of 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, Tsukuba, Japan, 2009: 87—90.
- [7] 简曲, 陈新明, 王明和. 21 世纪中国的大洋多金属结核工业开采[J]. *中国矿业*, 1997, 6(3): 16—19.  
Jian Qu, Chen Xingming, Wang Minghe. China's commercial mining of deepsea polymetallic nodules for 21th century[J]. *China Mining Magazine*, 1997, 6(3): 16—19. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王明和. 《中试采矿系统湖试试验报告》研究报告[R]. 长沙: 长沙矿山研究院, 2001.  
Wang Minghe. Research of lake-test of deep-sea piolt minging system[R]. Changsha: Changsha Institute of Mining Research, 2001.
- [9] 谢龙水. 深海履带式集矿机设计的研究[J]. *有色矿山*, 1995(6): 8—13.  
Xie Longshui. Research on the design of the seabed tracked vehicle[J]. *China Mine Engineering*, 1995(6): 8—13. (in Chinese with English abstract)
- [10] 简曲, 王明和. 深海采矿集矿机的设计[J]. *矿业研究与开发*, 1998, 18(1): 33—36.  
Jian Qu, Wang Minghe. Design of the seabed tracked vehicle[J]. *Mining Research and Development*, 1998, 18(1): 33—36. (in Chinese with English abstract)
- [11] Schulte E, Handschuh R, Schwarz W. Transferability of soil mechanical parameters to traction potential calculation of a tracked vehicle[A]//The Proc of 5th ISOPE Ocean Mining Symposium, Tsukuba, Japan, 2003: 121—131.
- [12] Choi Jong-su, Hong Sup, Kim Hyuang-Woo. An experimental study on tractive performance of tracked vehicle on cohesive soft soil [A]//The Proc.of 5th ISOPE Ocean Mining Symposium, Tsukuba, Japan, 2003:139—143.
- [13] 李力. 《自行式海底作业车的研制》研究报告[R]. 长沙: 长沙矿山研究院, 2001.  
Li Li. Development of self-propelled seabed tracked vehicle [R]. Changsha: Changsha Institute of Mining Research, 2001. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李力, 李庶林. 深海表层海泥模拟及地面力学特性研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(11): 213—220.  
Li Li, Li Shulin. Simuation and mechanical characteristics of terramechanics of the surface soil on deep-sea bed[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(11): 213—220. (in Chinese with English abstract)
- [15] 姬长英, 潘君拯. 湿软土壤剪切应力-剪切速度-时间关系及其应用(第 1 报): 湿软土壤剪切变形机理探析[J]. *农业工程学报*, 1994, 10(4): 20—25.  
Ji Changying, Pan Juncheng. Shear Stress-Shear Rate-Time Relationship of wet and soft soils and its application (Part 1): investigation on shear deformation mechanism of soils[J]. *transactions of the chinese society of agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 1994, 10(4): 20—25. (in Chinese with English abstract)
- [16] 姬长英, 潘君拯. 湿软土壤剪切应力-剪切速度-时间关系及其应用(第 2 报): 湿软土壤的剪切应力-剪切速度-时间关系[J]. *农业工程学报*, 1994, 10(4): 26—31.  
Ji Changying, Pan Juncheng. Shear Stress-Shear Rate-Time Relationship of Wet and Soft Soils and Its Application (Part 2): shear stress-shear rate-time relationship[J]. *Transactions of the chinese society of agricultural engineering (Transactions of the CSAE)*, 1994, 10(4): 26—31. (in Chinese with English abstract)
- [17] 姬长英, 潘君拯. 湿软土壤剪切应力-剪切速度-时间关系及其应用(第 3 报): 湿软土壤上履带板的推力计算[J]. *农业工程学报*, 1994, 10(4): 32—36.  
Ji Changying, Pan Juncheng. Shear stress-shear rate-time relationship of wet and soft soils and its application (Part 3): pull predication for a single track shoe[J]. *Transactions of the chinese society of agricultural engineering (Transactions of the CSAE)*, 1994, 10(4): 32—36. (in Chinese with English abstract)
- [18] Wu Hongyun, He Jiansan, Chen Xinming, et al. Establishment of the deep-sea soft sediments shearing strength-shearing displacement model[J]. *Modeern Applied Science*, 2010, 4(1): 21—27.
- [19] Marek M. Poncyliuse. The Influence of track-type tractor shoe's shape on its tracktive performance[A]//The Proc of 13th International Conference of the ISTVS Munich, Germany, 1999: 185—191.
- [20] Wang X L, Ito N, Kito K. Studies on optimum dimension of grouser to generate maximun traction[J]. *Terramechnics*, 1998, 18: 35—40.
- [21] Wong Y. Theory of ground vehicle[M]. Canada: John Wiley and Sons, Inc., 2001.

- [22] 杨红旗. 工程机械履带-地面附着力矩理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [23] 李克健. 车辆地面力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [24] 吴鸿云. 集矿机牵引性能若干影响因素研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.  
Wu Hongyun. Research on Some Factors on Driving Performance of Seabed Tracked Vehicle on Seabed Soft Sediments[D]. Changsha: Centural South University, 2010. (in Chinese with English abstract).
- [25] 吴鸿云, 陈新明, 刘少军, 等. 履带板、齿间黏附底质对集矿机附着性能的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 140-145.  
Wu Hongyun, Chen Xinming, Liu Shaojun, et al. Research on effects of soft sediment adhered to track on adhesion performance of seabed track vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(10): 140-145. (in Chinese with English abstract)

## Influence of shoe tooth height of tracked vehicle on traction performance and its parameter determination

Xu Yan<sup>1</sup>, Wu Hongyun<sup>2,3\*</sup>, Zuo Libiao<sup>3</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Changsha University, Changsha 410003, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Department of Ocean Mining, Changsha Institute of Mining Research Limited Liability Company, Changsha 410012, China)

**Abstract:** In order to analysis the influence of height of seabed of track shoe tracked vehicle on traction performance, the shearing strength-shearing displacement model of deep-sea soft sediments were obtained by shearing testing of simulated sediments in testing pool, and then the traction force model of the sediments and the adesion force model of the tracked seabed vehicle were founded. The influence of the height of track shoe on the traction performance of the seabed tracked vehicle was researched by traction force model and adesion force model. According to the research, the traction performance of the vehicle increases with the height of the track shoe on deep-sea soft sediments, and the traction force of the vehicle on sediments increases quickly with the height of track shoe. The adesion force increases quickly when the height of track shoe is less than 15 cm and then increases slowly when it is more than 15 cm. The height of track shoe should be not more than 15 cm.

**Key words:** construction equipment, adhesion, drives, seabed tracked vehicle, deep-sea soft sediments, traction performance, height of track shoe