



深海稀软底质特性及 采矿车行走性能研究进展

饶秋华¹, 刘泽霖¹, 许 锋², 黄 维¹, 马雯波³

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075;

2. 南华大学 数理学院, 衡阳 421001;

3. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湘潭 411105)

摘 要: 深海海域蕴藏的丰富矿产资源被认为是 21 世纪陆地矿最重要的替代资源, 加大深海矿产资源开发与利用力度, 已成为全球经济可持续发展的重要抉择, 是我国建设海洋强国的重大战略需求。采矿车在深海稀软底质上的行走性能对深海矿产资源开采的安全稳定性具有重要影响。本文回顾了深海采矿方法及采矿车的发展历程, 总结了深海稀软底质基本物理力学特性特别是流变特性及其本构关系, 分析了采矿车行走运动特性及其牵引力的研究现状以及存在的主要问题, 探讨了深海采矿车行走性能及结构优化设计的未来研究方向, 为构建环境友好的深海采矿作业系统提供理论依据。

关键词: 深海采矿; 采矿车; 底质流变; 本构关系; 运动特性; 牵引力; 结构优化设计

文章编号: 1004-0609(2021)-10-2795-22

中图分类号: P75

文献标志码: A

引文格式: 饶秋华, 刘泽霖, 许 锋, 等. 深海稀软底质特性及采矿车行走性能研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2795–2816. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42120

RAO Qiu-hua, LIU Ze-lin, XU Feng, et al. Research progress on characteristics of deep-sea soft sediment and walking performance of mining vehicle[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2795–2816. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42120

随着地表矿产资源的逐渐枯竭, 人们开始向地球深部进军的同时, 丰富的海洋矿产资源自然地成为了关注的重点^[1-3]。自 20 世纪 60 年代开始, 国内外投入大量资金对海洋矿产资源进行勘探, 发现仅太平洋的锰、镍、铜、钴等矿产资源储量已经达到陆地资源储量的数十倍乃至数百倍^[4]。我国在太平洋 C-C(Clearn fracture zone-clipperton fracture zone)区约 7.5 万 km² 的多金属结核资源专属区拥有 4.2 亿 t 的干结核量, 其中可提炼出约 11175.32 万 t 锰、406.40 万 t 铜、514.42 万 t 镍和 98.49 万 t 钴, 预计可形成年产 300 万 t 干结核、开采周期 20 年的深海产业^[5]。海洋矿产资源被认为是 21 世纪陆地矿最重要的替代资源, 加大深海矿产资源的开发与利

用力度, 已成为全球经济可持续发展的重要抉择。我国“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要要进一步强调: 积极拓展海洋经济发展空间, 坚持陆海统筹、人海和谐、合作共赢, 协同推进海洋生态保护、海洋经济发展和海洋权益维护, 加快建设海洋强国^[6]。其中, 发展深海矿产资源开采技术在深海资源的竞争中具有重大意义。

目前, 海洋矿产资源的开发主要集中在近海岸的浅海区域, 对远洋深海矿产资源的大规模商业开发与利用仍处于研究阶段, 深海资源开采已成为多国的战略发展目标。我国自“八五”计划以来, 设立了多个专项规划和重大项目并投入了大量资金以支持海洋装备技术的研发, 特别在 2019 年的国

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274251, 12072309)

收稿日期: 2021-07-30; 修订日期: 2021-09-13

通信作者: 饶秋华, 教授, 博士; 电话: 13787265488; E-mail: raoqh@csu.edu.cn

际海底管理局第 25 届会议上,我国在国际海底区域获得了第 5 块专属勘探区,极大地鼓舞了我国深海采矿事业的工作者们。由于海底矿产资源的特征及其赋存条件各异,例如类似于土豆形状的多金属结核多散落在深 4000~6000 m 的海底平原上,类似于苔藓状的富钴结壳则紧紧黏接在水深 1000~3500 m 处顶面平坦、两翼陡峭的斜坡上,热液硫化物则多分布于 1200~3500 m 深的海底火山附近,因此,针对不同的海底矿产资源需要采用不同的开采方式。目前,我国深海矿产资源的开采技术研究多集中于多金属结核矿物,主要采用流体提升式采矿法,即采矿车在海底切削破碎并收集矿石,然后通过管道水力提升至海面采矿船。作为深海采矿系统的核心部分,采矿车必须在稀软底质床面上稳定行走,以确保采矿作业的连续性和安全性。由于结核矿区的海底沉积物具有多孔性、高含水率和低强度等特性,例如东太平洋西矿区沉积土的最大剪切强度仅为 11.8 kPa^[7-8],重达数吨的采矿车在深海稀软底质上行走时容易打滑而影响安全作业,因此研究稀软底质的物理力学特性对采矿车行走性能的影响极为重要^[9]。

本文在回顾深海采矿方法及采矿车发展历程的基础上,对深海稀软底质的物理力学特性特别是流变特性的研究进行了综述,分析了采矿车行走的运动特性和牵引力的研究现状以及存在的主要问题,并探讨了深海采矿车行走性能及结构优化设计的未来研究方向,为构建环境友好的深海采矿作业系统提供理论依据。

1 深海采矿车发展概述

早在 1873 年 2 月,英国挑战者号考察船(HMS Challenger)在南太平洋的佛罗岛西南收集的样本中就发现了深海多金属结核^[10],但直到 1957 年 MERO 首次对开采结核矿的技术经济性进行分析后,深海矿产资源的开发才引起世人瞩目^[5,11]。自 20 世纪 60 年代开始,多国及支持的国际财团致力于加速勘探深海矿物(见图 1^[12])及研发深海采矿系统,研制出的三种深海采矿系统为^[13]:连续绳斗式(CLB)采矿系统^[14](见图 2(a))、穿梭艇式采矿系统^[15](见图 2(b))和水-力提升式采矿系统^[16](见图 2(c)),其中前两种采矿方法因开采能力或技术问题而较少采用^[17-18]。

在整个采矿系统中,采矿车作为与深海底质和矿物直接接触的关键设备因而一直是重点研究对象。对深海采矿车行走方式的研究始于 20 世纪 70 年代,历经了从最初日本研制的拖曳式采矿车^[19]到美国研制的阿基米德螺旋式自动行走式采矿车^[20](见图 3),后者于 1976 年和 1978 年在南太平洋进行了海上试验,取得了良好的成效^[20-21]。此后,德国西根大学(University of Siegen)于 1992 年独立研制了履带式采矿车^[22](见图 4(a)),2000 年又与印度国家海洋技术研究所(NIOT)联合开发了水下采矿系统和柔性立管试验系统(见图 4(b)和(c)),在 410 m 水深的印度洋得到了验证,并于 2006 年对改进后的系统在果阿海岸 451 m 深进行了长期操纵性和泵

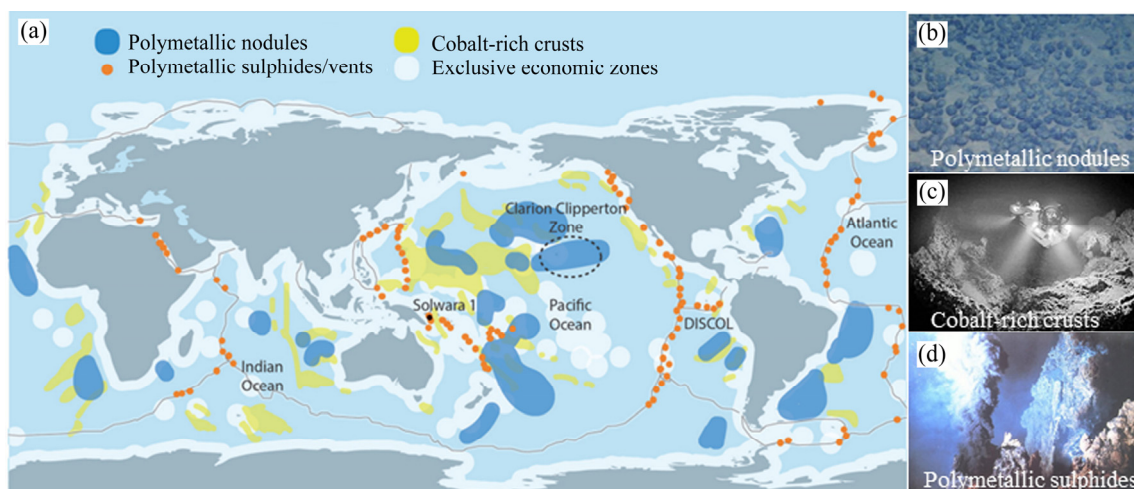


图 1 世界主要海洋矿床地图及海底矿物^[12]

Fig. 1 World map of major marine deposit locations and different seabed minerals^[12]: (a) Marine deposit locations; (b) Polymetallic nodules; (c) Cobalt-rich crusts; (d) Polymetallic sulphides

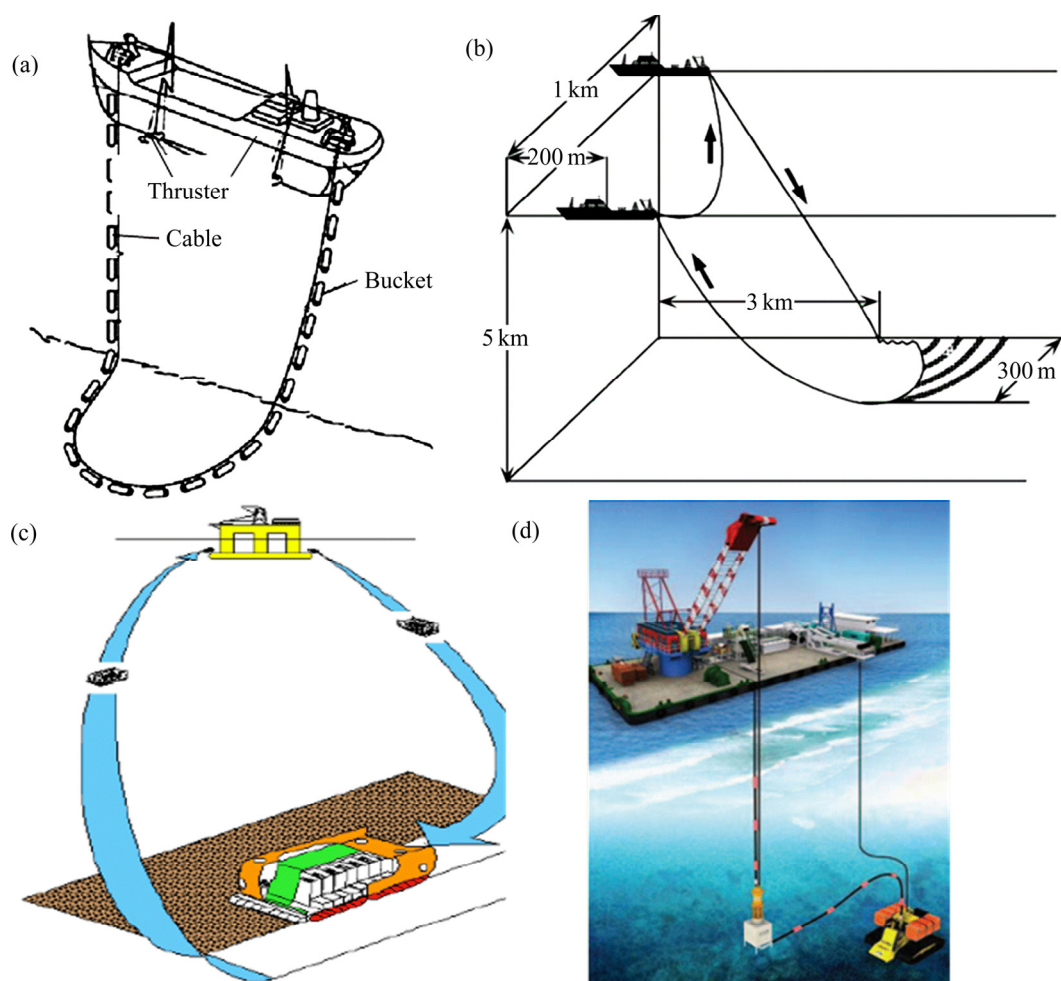


图 2 常用的深海采矿系统

Fig. 2 Common deep-sea mining system: (a) Single ship CLB system; (b) Double ship CLB system; (c) Shuttle vessel mining system; (d) Deep-sea hydraulic-lifting mining system

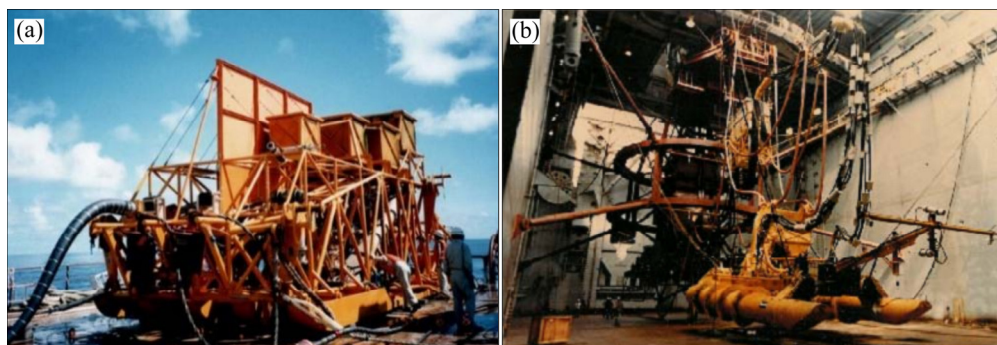
图 3 拖曳式采矿车^[19]和阿基米德螺旋式自动行走采矿车^[21]

Fig. 3 Mining vehicles towed mining vehicle^[19](a) and Archimedes spiral self-propelled mining vehicle(b)^[21]

送作业测试试验^[23]。此外, 韩国船舶与海洋工程研究所(KRISO)于 2007 年和 2012 年分别研制了 $5\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的 MineRoTM^[24]型和 $6.5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 4\text{ m}$ 的 MineRo II 型深海采矿车(见图 5), 并用于中试规

模的锰结核采矿, 其中 MineRo II 于 2013 年在在韩国东海顺利地进行了 130m 水深航行转向性能的测试试验^[25]。

我国自 20 世纪 90 年代开始研制深海采矿车,

长沙矿山研究院在“八五”期间自主研发了采用近似渐开线高履齿橡胶履带的第一代履带自行式采矿车(4.6 m×3 m×2.1 m)(见图 6(a))。在“九五”

期间,中南大学与法国 Cobynetic 公司合作开发了第二代深海采矿车(见图 6(b)),该采矿车具有特殊的锋利三角形齿轨(9.2 m×5.2 m×3 m),于 2001 年

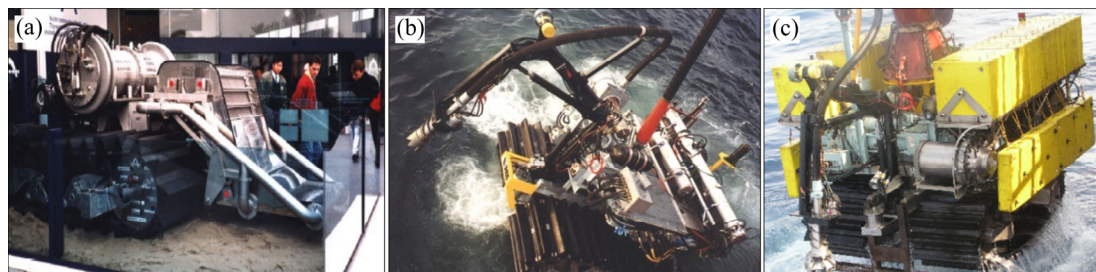


图 4 深海采矿车(德国和印度)

Fig. 4 Deep-sea tracked mining vehicle (in Germany and India): (a) Made by German in 1992^[22]; (b) Made by German-Indian cooperation in 2000^[23]; (c) Made by German-Indian cooperative in 2006^[23]

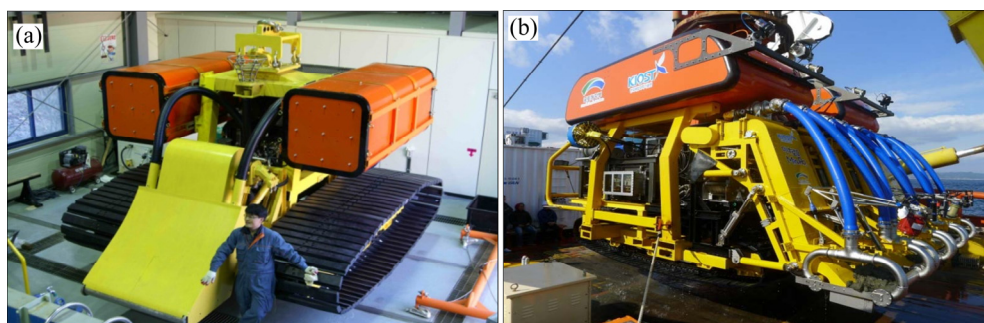


图 5 深海采矿车(韩国)

Fig. 5 Deep-sea mining vehicle (in Korea): (a) MineRoTM mining vehicle^[24]; (b) MineRo II mining vehicle^[25]

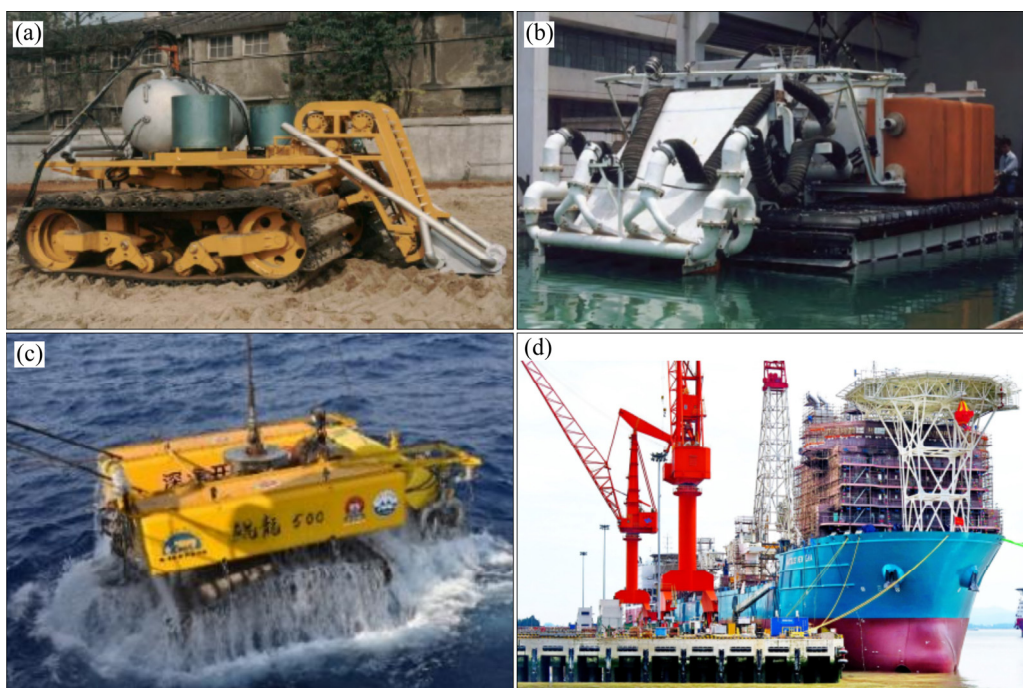


图 6 深海履带式采矿车(中国)^[26]

Fig. 6 Deep-sea crawler mining vehicle (in China)^[26]: (a) First-generation deep-sea mining vehicle; (b) Second-generation deep-sea mining vehicle; (c) Kunlong 500 mining vehicle; (d) “Nautilus New Era” deep-sea mining vessel

在云南抚仙湖进行了 135 m 深的湖试,成功地收集了 9000 kg 的人工锰结核^[26],初步实现了预期目标。2018 年,中国自主研发的鲲龙 500 采矿车在南海完成了最大深度达到 514 m、为期 49 d 的海试,标志着我国顺利进入了海试阶段。同年,MAC 公司全球首制、中国福建马尾造船公司负责建造的“鹦鹉螺新纪元”号深海采矿船在福州出坞(见图 6(d)),船长 227 m、装载能力达 39000 t、可下水深度 2500 m,属于深海采矿领域的世界性技术前沿^[27]。2019 年,中国科学院深海科学与工程研究所完成了 2498 m 深的采矿车单体海试^[28]。今年,我国也正在紧锣密鼓地开展 1000 m 级海洋采矿系统整体联动试验,致力于提升我国深海采矿领域的自主创新能力和国际话语权。

2 深海稀软底质特性研究进展

2.1 深海稀软底质基本物理特性

在采矿作业中,深海稀软底质的物理和力学特性对采矿车牵引力和行走安全影响较大。在我国获

得的太平洋 C-C 专属勘探区内,海底稀软底质以粉质土和有机黏土为主,其中东、西矿区的粉质土约占 53%和 74%、黏土约占 38%和 21%^[29]。土样的粒径范围为 0.06~76.32 μm ,主要由极细的砂粒($0.075\text{ mm} < d \leq 2\text{ mm}$)、粉粒($0.005 < d \leq 0.075\text{ mm}$)、黏粒($d \leq 0.005\text{ mm}$)和胶粒($d \leq 0.002\text{ mm}$)组成,敏感系数达 4.5~6.7,属于高灵敏性土。若底质被完全扰动,其强度只有原始状态值的 17%~20%^[30-31]。通过对深海稀软底质进行 X 射线分析,其主要成分为绿泥石、伊利石、蒙脱石和硅藻,其微结构主要以黏土矿物构成蜂窝絮凝状结构和粉粒构成的片层骨架状结构为主(见图 7(a)),且呈现出高含水率(312%~577%)、极小内摩擦角($< 8^\circ$)、高液限(160%~280%)、高塑性(105%~136%)、大孔隙比(约 90%)、低强度($\tau=4.0\sim 15.5\text{ kPa}$)和低密度($1.13\sim 1.15\text{ g/cm}^3$)等特性(见图 7(b))^[30, 32-33]。深海稀软底质表层可以从上往下划分为强度小于 1 kPa 的半液态层和大于 1 kPa 的固结层(见图 7(c))^[34],其中力学特性特别是流变特性对采矿车的行走打滑影响很大^[35],也关系到采矿车能否获得足够的牵引力。

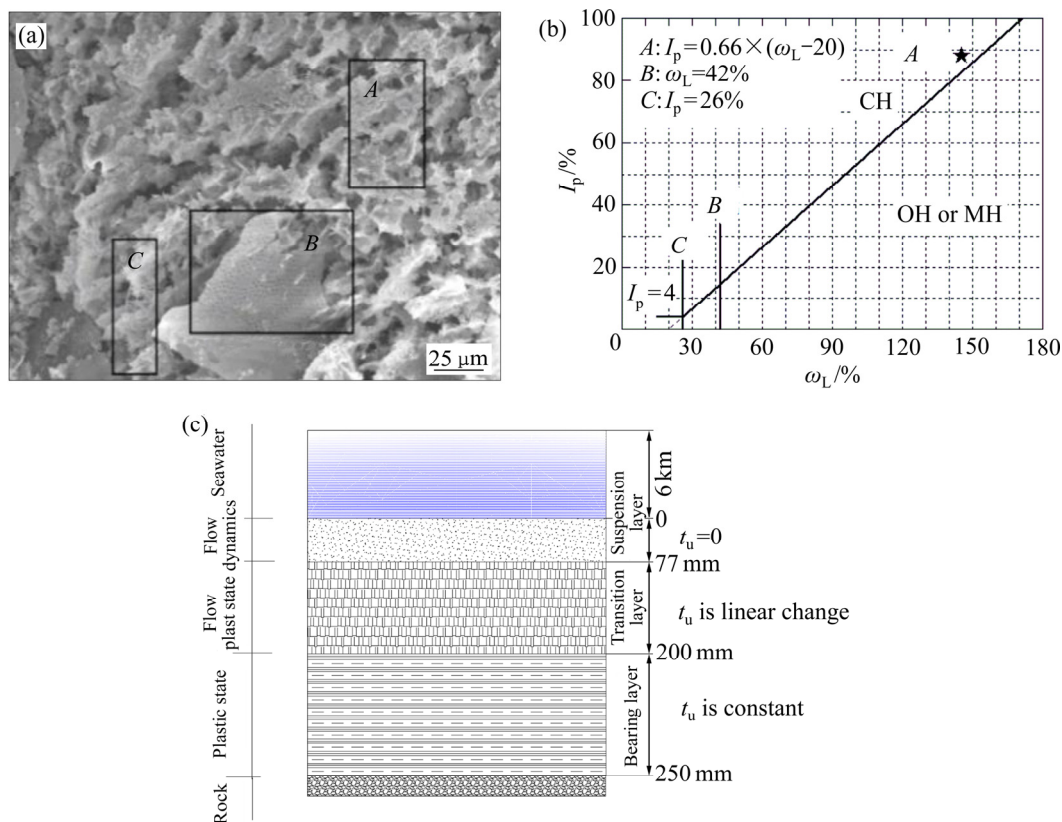


图7 深海稀软底质物理特性^[36-37]

Fig. 7 Physical characteristics of deep-sea soft sediment^[36-37]: (a) Microstructure; (b) Cartesian plasticity diagram; (c) Macrostructure

2.2 深海稀软底质基本力学特性及本构关系

关于深海稀软底质基本力学特性的研究,如剪切强度、贯入阻力、承载力、本构方程等,主要采用两种方式:原位测试、从海底沉积物中采集样本进行现场或实验室测试。

在深海稀软底质的原位测试方面,国内学者主要采用基于十字板剪切和浅层静力触探试验的原位测试方法,获得了东太平洋中国西矿区 41 个测点的深海稀软底质剪切强度 C_u 和贯入阻力 p_s 数据^[8],为采矿车履带接地比压的确定奠定了基础。结果表明: C_u 和 p_s 均随着原位深度的增加而增大,在 $h=40\sim 45$ cm 时均达到其最大值($C_{u,max}=11.8$ kPa 和 $p_{s,max}=100.0$ kPa)后小幅度下降(见图 8);当 C_u 和 p_s 在 $h=0\sim 8$ cm 达到极小时,深海底质的抗剪和承载性能极差,呈流动态,无法提供采矿车所需的牵引力和承载力,从而导致采矿车极易打滑和压陷;

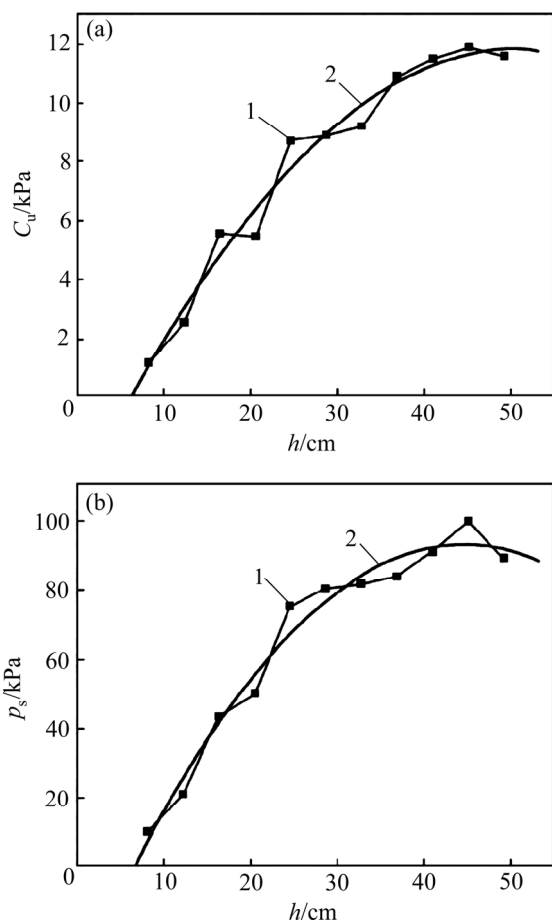


图 8 深海稀软底质力学特性原位测试结果^[8]

Fig. 8 In-suit testing results of mechanical properties for deep-sea soft sediment^[8]: (a) Relationship between shear strength C_u and in-situ depth h ; (b) Relationship between penetration resistance p_s and in-situ depth h

当 C_u 和 p_s 急剧增加时($h=8\sim 14$ cm 和 $h=20\sim 45$ cm),深海底质的抗剪和承载性能显著变化,呈流塑状,故采矿车履齿容易损坏,且快速压陷而造成行驶阻力急剧增加。因此,采矿车行走的最佳牵引层和持力层应选择 C_u 和 p_s 变化不大(即具有稳定的抗剪和承载能力)的底质层($h=14\sim 20$ cm)。

此外,英格兰和荷兰的研究者们于 1990 年在 5400 m 深海平原(Great Meteor East)也进行了深海底质的现场测试,结果表明^[38]:该底质是固结未硬化,具有层状性质,其剪切强度随剖面深度增加呈线性增大;当剖面深度达到 58 m 时,深海底质与陆地或浅水的软黏性沉积物并无本质区别。印度学者于 2011 年开发了一种可远程操作的深海底质原位测试仪(见图 9),主要包括锥形测试仪和剪切叶片测试仪,并在印度洋盆地(CIOB) 5462 m 深处对深海底质进行测量,其中抗剪强度 τ 和承载力 $\sigma(z)$ 可由式(1)和(2)计算得到^[39]:

$$\tau = (2T)/[\pi(hd^2 + 1/3d^3) \times 1000] \quad (1)$$

$$\sigma(z) = c \cdot N_c + \gamma \cdot z \cdot N_q \quad (2)$$

式中: T 为扭矩; h 和 d 分别为叶片高度和直径; N_c 和 N_q 均为承载力系数; c 和 γ 分别为深海底质的黏聚力和容重; z 为有效深度。

在深海底质的样品测试方面,国内学者在 DY95-6 航次“大洋一号”科学考察船上,采用 RV20 剪切仪(即十字板剪切试验)对我国专属勘探区采集的深海底质样品进行了不排水抗剪强度的现场测试^[31]。十字板剪切试验结果可以较好地反映深海底质的不排水抗剪强度随深度增加而增加、随含水率增加而减小的变化规律,但一般认为其测量值偏高,因此在工程中需要根据具体的底质条件对其进行修正。本课题组^[37]对采自太平洋 C-C 矿区的深海底质样本,通过固结试验和直剪试验分别测得了其压缩系数(4.461 MPa^{-1})、压缩模量(1.576 MPa)和剪切强度,并与不同成因的软土剪切强度进行了对比分析(见表 1)。结果表明:该深海底质具有压缩系数较高、压缩模量较低(属于高压缩性土)、孔隙比较大、含水率极高、黏聚力和内摩擦角均较小等特性,容易导致采矿机行走时产生较大的沉陷及打滑,从而影响深海采矿系统的正常作业。此外,韩国学者基于赤道东北太平洋深部 KR5 地区多芯取样的海底沉积物样品测试结果,采用以最小平均值



图 9 深海底质原位测试系统^[39]

Fig. 9 In-situ testing system of deep-sea sediment^[39]: (a) Model; (b) Tester; (c) Test procedure; (d) Operation interface

表 1 不同成因的软土剪切强度对比^[37]

Table 1 Comparison of shear strength among different soft clays^[37]

Type	Void ratio, <i>e</i>	Water content, <i>ω</i> /%	Cohesion, <i>c</i> /kPa	Internal friction angle, <i>φ</i> /([°])
General clay soil	0.55–1.00	15–30	10–50	15–22
Freshly deposited clayey soil	0.70–1.20	24–36	10–20	7–15
Coastal silty soil	1.00–2.00	36–70	5–15	4–10
Deep-sea soft substrate	6.03	246.2	12.6	3.1

为衡量标准时的 Wakeby 分布和最小标准差为衡量标准时的对数——logistic 分布来表征其剪切强度概率特征, 拟合精度最好^[40]。

当采矿车在深海稀软底质上行走时, 底质会受到来自采矿车传递的压应力和剪应力而产生沉陷和剪切变形。通常采用 Bekker 模型^[41]来描述深海底质的压陷本构关系, 如式(3)所示:

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \tag{3}$$

式中: p 为接地比压; z 为沉陷; n 为变形指数; b 为矩形板宽度; k_c 和 k_ϕ 分别为内聚变形模量和摩擦变形模量。

关于深海底质的剪切本构关系, 常用的有 Janosi-Hanamoto 模型^[42]:

$$\tau = (c + p \tan \phi) [1 - \exp(-j/K)] \tag{4}$$

式中: c 为内聚系数; f 为内摩擦角; p 为接地压力; K 为剪切模量; j 为剪切位移。

基于软土和膨润土剪切本构方程建立的修正模型^[43]如下:

$$\tau(j) = \{ \tau_{\max} \exp(l - j/k_m) e^{(e-1)} + \tau_{\text{Rest}} [1 - \exp(1 - j/k_m)] \} [1 - \exp(-j/k_m)] \tag{5}$$

式中: $\tau_{\max}$ 、 τ_{rest} 分别为最大剪应力和残余剪应力;

j 为剪切位移; k_m 为最大抗剪强度对应的剪切位移。

基于直剪试验数据拟合得到的经验模型^[36]如下:

$$\tau = \tau_{\max} \left[\exp\left(-\frac{j}{k_1}\right) - \exp\left(-\frac{j}{k_2}\right) \right] + \tau_r \left[1 - \exp\left(-\frac{j}{k_2}\right) \right] \tag{6}$$

式中: τ 、 $\tau_{\max}$ 和 τ_r 为水平剪切应力、最大剪切应力和为残余剪切应力; j 为剪切位移; k_1 和 k_2 为常数。

这些压陷和剪切模型均为弹塑性本构模型, 尚未考虑深海稀软底质与时间相关的流变特性。

2.3 深海稀软底质流变特性及流变本构关系

考虑到深海稀软底质具有多孔性、高含水率和低剪切强度等力学特性, 质量达数吨的采矿车在高压环境下的深海稀软底质床面行走, 容易产生随时间变化的沉陷和打滑现象。为确保深海采矿系统的正常连续作业, 必须研究深海稀软底质的流变特性。由于现场获得深海底质数量有限, 无法满足大量的流变试验和采矿车牵引力试验的材料需求, 故需要寻找一种模拟土来替代深海稀软底质。

本课题组基于采自太平洋 C-C 矿区的深海稀软底质的物理力学性能分析, 选取膨润土(以蒙脱石为主)作为原料与水按一定比例进行混合, 配制成与深

海底质性能相似的最佳模拟土^[44]。通过 GDS 三轴蠕变试验仪以及自主研制的压-剪蠕变试验装置(见图 10),开展了深海模拟土的单轴和三轴压缩^[45]、直剪^[44]和压-剪^[46]的蠕变试验。基于元件模型(Hooke-Kelvin 模型、Burgers 模型)和分数阶导数理论^[47],建立了深海模拟土的单轴压缩(见式(7))、三轴压缩(见式(8))和直剪(见式(9)和(10))流变本构方程:

$$z(\sigma, t) = \sigma \left\{ \frac{1}{\tilde{E}_1} + \frac{1}{\tilde{E}_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{\tilde{E}_2}{\tilde{\eta}} t \right) \right] \right\} \quad (7)$$

$$\varepsilon(t) = \sigma' \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{E_2}{\eta} t \right) \right] \right\} \quad (8)$$

$$s(\tau, \sigma, t) =$$

$$\tau \left\{ \frac{1}{\tilde{K}_1(\sigma)} + \frac{t}{\tilde{\beta}_1(\sigma)} + \frac{1}{\tilde{K}_2(\sigma)} \left[1 - \exp \left(-\frac{t \tilde{K}_2(\sigma)}{\tilde{\beta}_2(\sigma)} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

$$\frac{\beta_1 \beta_2^\alpha}{K_2} D^{1+\alpha} s + \beta_2^\alpha D^\alpha s = \frac{\beta_1 \beta_2^\alpha}{K_1 K_2} D^{1+\alpha} F + \frac{\beta_1}{K_2} D F + \frac{\beta_2^\alpha (K_1 + K_2)}{K_1 K_2} D^\alpha F + F \quad (10)$$

式中: $\tilde{E}_1$ 、 $\tilde{E}_2$ 、 E_1 、 E_2 为压缩弹性流变参数; K_1 、 K_2 、 $\tilde{K}_1$ 、 $\tilde{K}_2$ 为剪切弹性流变参数; $\tilde{\eta}$ 、 β_1 、 β_2 、 $\tilde{\beta}_1$ 、 $\tilde{\beta}_2$ 为黏性参数; η 为黏度; t 为时间; $D=d/dt$ 为一阶微分算子; σ 、 σ' 、 ε 分别为压应力、偏压应力、压应变; τ 、 A_0 、 s 分别为剪应力、剪切面积、剪位移; z 为沉陷深度; F 为牵引力; α 为常数, $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

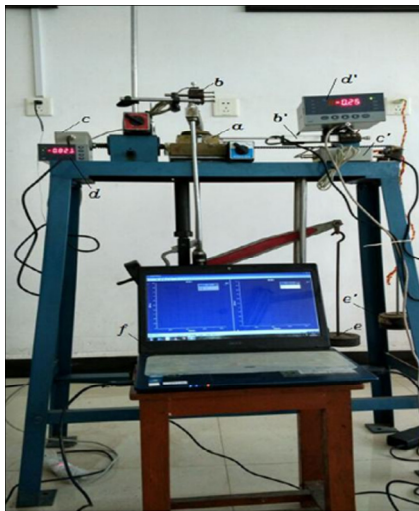


图 10 压-剪蠕变试验装置^[46]

Fig. 10 Compression-shear creep testing device^[46]

考虑到压-剪蠕变试验中,深海模拟土的压缩位移-时间曲线(见图 11)不仅与压应力 σ 有关且随剪应力 τ 的不同而不同,其剪切位移-时间曲线(见图 12)不仅与 τ 有关,且随 σ 的不同而不同,即存在压-剪耦合效应,故采用内时理论建立了深海模拟土的压-剪耦合流变本构方程:

$$\begin{cases} \sigma = E_1' z + E_2' t^{-M_2} z^2 + (E_4' t^{-M_1} + E_3' t^{-M_2}) z s \\ \tau = E_1^* s + E_2^* t^{-M_1} s^2 + (E_4^* t^{-M_1} + E_3^* t^{-M_2}) s z \end{cases} \quad (11)$$

式中: E_i^* 、 E_i' ($i=1, 2, 3, 4$) 和 M_j ($j=1, 2$) 为耦合流变参数; z 、 s 分别为压缩和剪切位移。

此外,本课题组还通过自行设计的动压陷蠕变试验装置(见图 13)测得了深海模拟土的动压陷蠕变曲线,该曲线具有与静压陷蠕变试曲线相似的瞬态、不稳定和稳定蠕变等三个阶段,并采用 K-H 流变模型建立了深海模拟土的动压陷流变本构方程^[48]:

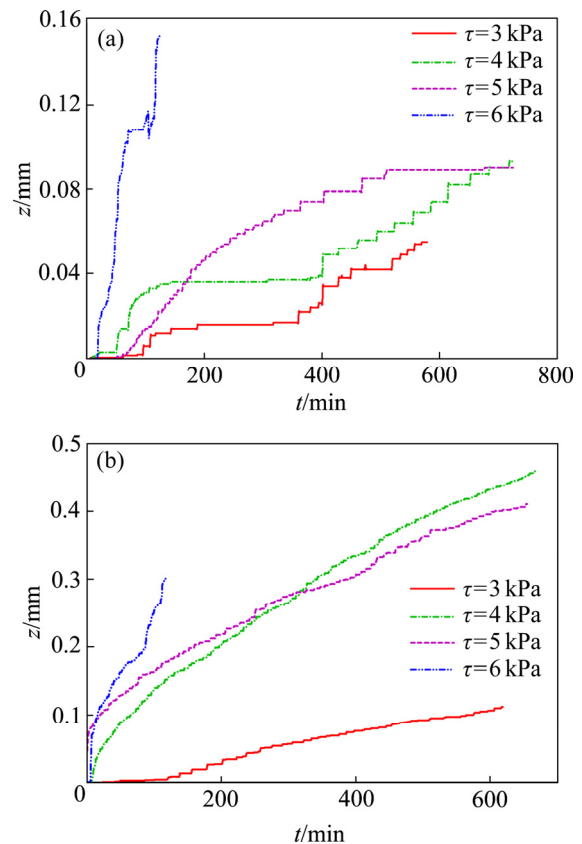


图 11 深海模拟土压缩位移-时间曲线(压-剪蠕变试验)^[46]

Fig. 11 Compressive displacement-time curves of deep-sea sediment simulant in compression-shear creep tests: (a) $\sigma=10$ kPa; (b) $\sigma=15$ kPa^[46]

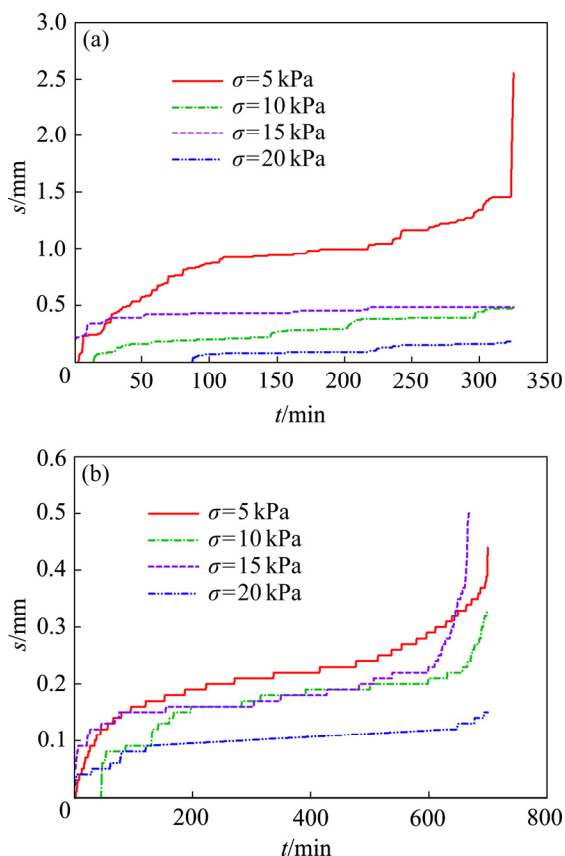


图 12 深海模拟土剪切位移-时间曲线(压-剪蠕变试验)^[46]

Fig. 12 Shear displacement-time curves of deep-sea sediment simulant in compression-shear creep tests: (a) $\tau = 1$ kPa; (b) $\tau = 3$ kPa^[46]

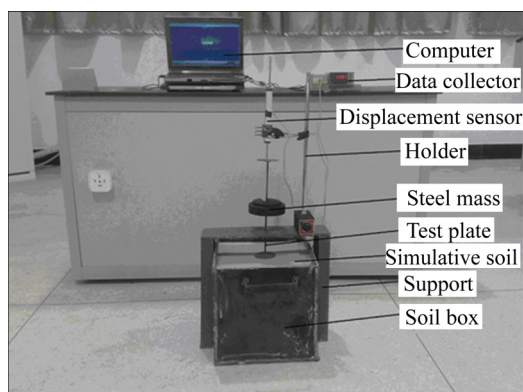


图 13 动压陷蠕变试验^[48]

Fig. 13 Impact compressive creep test^[48]

$$z(t) = \sigma A_0 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{z_{st}}} \right) \cdot \left\{ \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_2}{\beta} t \right) \right] \right\} \quad (12)$$

式中: K_1 、 K_2 为流变系数; β 为黏性参数; z_{st} 为静压陷瞬时变形力; A_0 和 H 为冲击面积和高度。

利用式(12)可预测不同接地压力 σ 和不同行走速度下深海履带式集矿机的最大沉陷量, 为集矿机的安全作业和优化设计提供理论依据。关于深海稀软底质的动态流变特性, 需要针对采矿车的具体作业模式(与海底矿物的赋存状态有关)开展进一步研究。

3 采矿车行走性能研究进展

3.1 采矿车行走运动特性

深海采矿车在复杂的海底床面行走时(包括直行、转向、越障等), 因稀软底质剪切强度较低且流变特性较强而容易产生沉陷、打滑等现象, 因此, 研究采矿车行走运动特性对其通过性和作业稳定性评定具有重要意义。

为了保证采矿车在深海底质上安全直行且控制其沉陷量, 通常从履齿结构、接地比压、移动速度、滑移控制系统等方面开展研究。HERRMANN^[49]通过对可能遇到的海底条件、底质流动性和采矿车行走通过性进行总结分析, 表明采用履带式或阿基米德螺旋的轻质运行齿轮形式具有良好的行走性能。KIM 等^[50]建立了履带式采矿车的单体和多体模型, 分别采用单体和多体动力学方法计算了采矿车履带在稀软底质上的直行距离、偏移距离和移动速度, 结果表明多体动力学方法比单体动力学方法更能反映采矿车部件之间的作用力传递, 更适合于采矿系统的优化设计。HERZOG 等^[35]对锡根大学研制的采矿车滑移控制系统进行了地面试验验证, 但需要进一步在深海环境下验证其打滑控制。孙海舰等^[51]设计了浮力调节装置以解决履带式采矿车的沉陷和打滑问题(见图 14), 该装置能够快速有效地降低打滑率以保证采矿车平稳运行。此外, 彭建平^[52]研究了扬矿软管的拉伸作用对深海采矿车行走运动的影响规律, 即随着软管拉力的增加, 采矿车行走速度降低, 且矿车航向角偏差增大。

为了实现深海采矿车的顺利转向, 通常从转弯速度、转弯路径、转向驱动力、滑转率、转向控制系统等方面开展研究。KITANO 等^[53]根据采矿车履带的滑移特性建立了相应的数值计算模型, 求得了

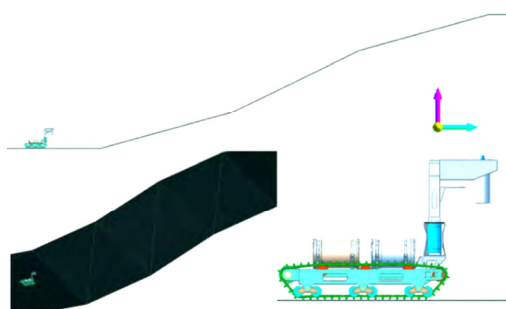


图 14 履带式采矿车浮力调节动力学模型^[51]

Fig. 14 Dynamic model of buoyancy adjustment of a tracked mining vehicle^[51]

履带滑移、惯性力和转动惯量等,用于分析和预测采矿车的转向动力学特征和转向性能,揭示了初始速度对履带滑移速度、侧滑角、横摆角速度等的影响规律。SHILLER 等^[54]将采矿车的行驶路径分为直线段和曲线段,提出了一种计算履带车在平面上行驶速度的新方法,并通过履带车在平坦和倾斜的平面上沿圆周运动的算例验证了该方法的可行性。OH 等^[55]通过改变履带的速度对四排履带采矿车的转向影响进行了研究,提出了深海采矿车在底质上转向行驶的最佳曲线驱动方法,并利用 DAFUL 软件构建了采矿车-底质的动力学分析模型,计算了相应的滑移和沉降量。DAI 等^[56]综合考虑了履带式采矿车回采作业的安全性和效率,提出了两种改进的深海采矿路径,该路径具有转弯半径相对较长且

转弯前后的直线轨迹间距为采矿车的总宽度的共同特征,可以避免较大的采矿车下沉和滑移且尽可能收集到更多的深海矿物,并通过两种改进的采集路径下采矿车转弯行走的动态仿真计算结果得到了验证。此外,UMARU 等^[57]建立了采矿车履带系统转向运动模型和控制方程,通过对速度、有效牵引力、地面反作用力、压实阻力等的计算,实现了转向运动过程中的力和速度、转向比、坡度角和滑移等参数之间的关联性。KIM 等^[58]和 HONG 等^[59]分别采用 Newmark 方法和增量迭代算法,通过三维瞬态动力学模拟仿真研究了履带车的转向性能,包含转向轨迹、轨道滑动、剪切位移、沉陷、旋转中心的瞬时偏移等(见图 15)。刘伟等^[60]通过拟牛顿法(BFGS)并结合打滑条件下履带式采矿车稳态差速转向的数学模型,计算并分析了轨距、纵向间距、履带宽度和长度等参数对四履带采矿车转向驱动力、滑转率等性能指标的影响(见图 16)。另外,张海宁^[61]建立了海底斜坡转向的运动学模型,设计了以最优控制器为核心的转向控制系统,并运用 MATLAB/Simulink 平台对斜坡上采矿车转向控制进行了模拟仿真,结果表明在 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的海底斜坡上采矿车可以安全行驶,当斜坡倾角继续增大时采矿车可能会出现不稳定因素而影响到海底采矿安全作业。

关于深海采矿车的越障能力研究,主要涉及到采矿车行走机构、控制系统、通过性准则等问题。

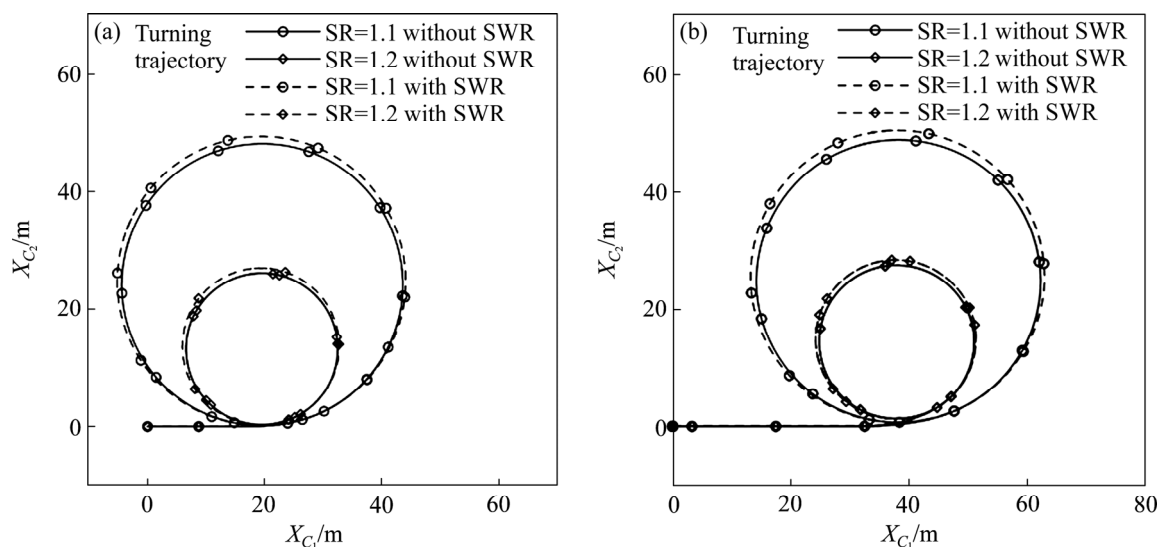


图 15 履带车转向轨迹^[59]

Fig. 15 Turning trajectories of tracked vehicle at rate of 0.5 m/s(a) and 1 m/s(b)^[59] (SR: Steering ratio; SWR: Side wall resistance)

邹吉炎^[62]、迟洪鹏等^[63]和刘金辉等^[64]采用 ADAMS 软件对悬臂式六轮移动采矿车的斜坡型和阶梯型两种越障能力、复合轮式海底采矿车的壕沟越障和斜坡越障能力(见图 17)进行了仿真计算,通过优化悬臂式六轮采矿车的铰链与车轮中心垂直距离以及铰链与杆左端距离,可显著地提高采矿车的越障性能。吴国锐^[65]、HUANG 等^[66]和 GUO 等^[67]利用 ADAMS/ATV 软件对履带式采矿车行走在平地、一定倾角的斜坡和沟、垂直障碍等进行了模拟仿真计算,通过分析采矿车的重心位置、履带行走速度及运动曲线来评判其行走稳定性。李力等^[68-69]提出了基于自适应模糊推理系统(ANFIS)的海底采矿车直线路径跟踪控制方法(见图 18),并基于控制器局域网(CAN)总线通信方式设计了适用于海底采矿的行走控制系统方案,解决了采矿车在海底越过复杂地形时所产生的偏离预定路径问题。徐立^[70]研制出了深海履带车行驶控制的电子测控系统,经过试验测试验证了该系统可达到设计的工作性能要求。陈昱

衡等^[71]利用改进的 A*算法进行全局路径规划,并综合考虑路程和时间消耗等条件,计算并分析了合理的避障路径(见图 19)。

本课题组首次考虑深海稀软底质的流变特性,开展采矿车行走运动性能的研究^[72]。通过编制深海底质流变本构模型的二次开发计算程序并引入到 RecurDyn 多体动力学软件,建立了不同截面形状的履带齿虚拟样机结构模型,对履带式样机直行(不同直行速度)、转弯(不同转弯速度)、越障(上下坡:不同坡度、齿个数;沟壑:不同越沟速度、沟壑宽度)等行走运动特性进行仿真计算,验证了优化后的尖三角形和厚三角形履带齿采矿车具有更小的沉陷和更好的稳定性。同时,基于集矿机履带上各点沉陷不同所形成的沉陷形状,通过功能原理并结合深海地形障碍(沟壑、上下坡)的几何形状,定义了沉陷面积参数,并综合考虑深海底质流变特性、履带结构参数、接地比压分布等,建立了新型履带式采矿车越障的通过性准则^[73]。该准则解决了现有的行

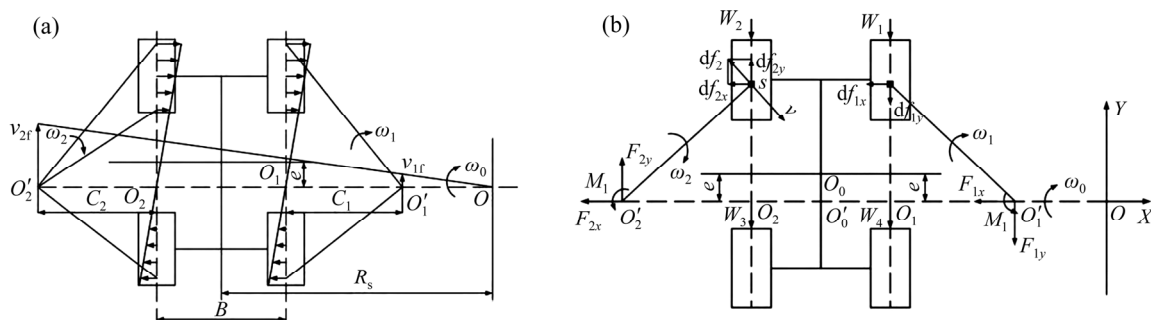


图 16 四履带采矿车转向运动学分析和转向方程分析^[60]

Fig. 16 Turning analysis of four-tracked mining vehicle of steering kinematic analysis(a) and steering equation analysis(b)^[60]

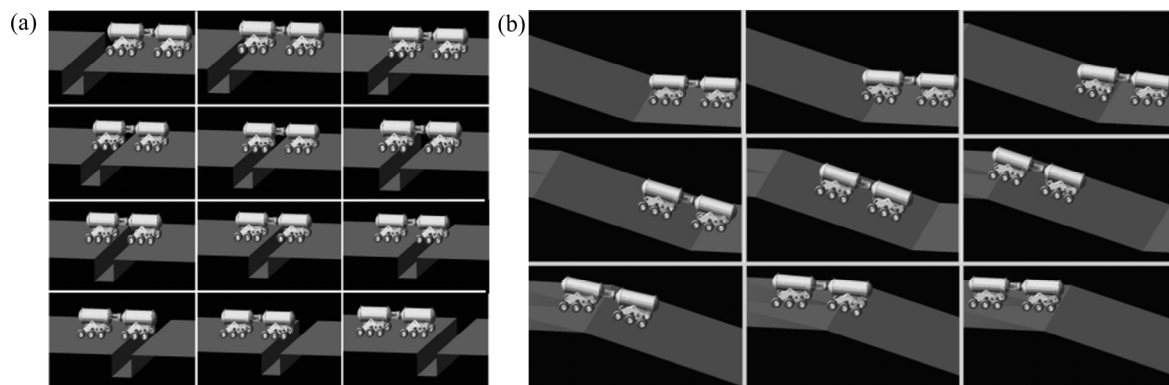


图 17 深海采矿车穿越障和爬坡仿真计算^[63-64]

Fig. 17 Simulation of deep-sea mining vehicle overcoming obstacles^[63-64] of crossing obstacles(a) and climbing(b)

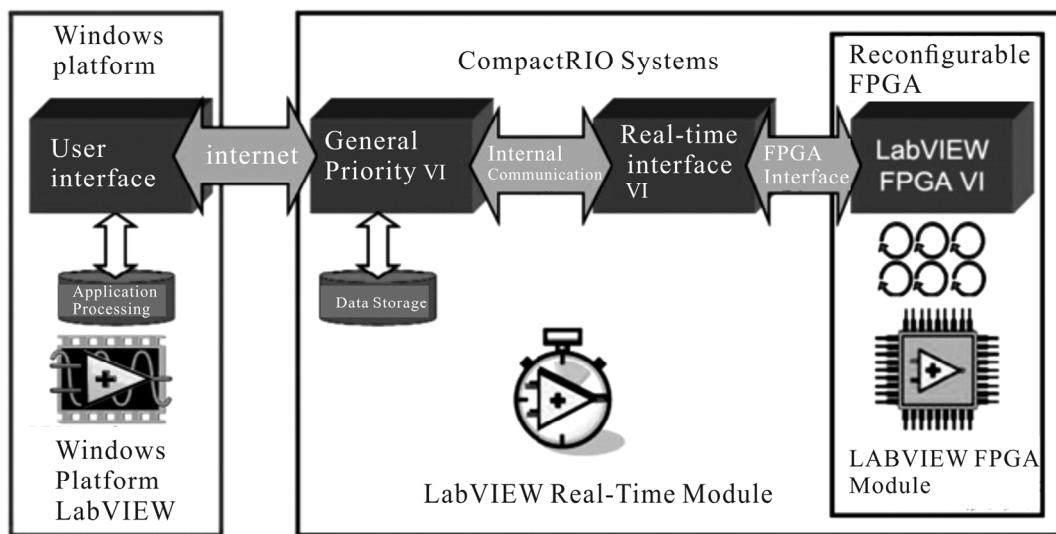


图 18 深海采矿车行走路径监控系统程序结构^[69]

Fig. 18 Monitoring-system program structure of mining-vehicle travelling position^[69]

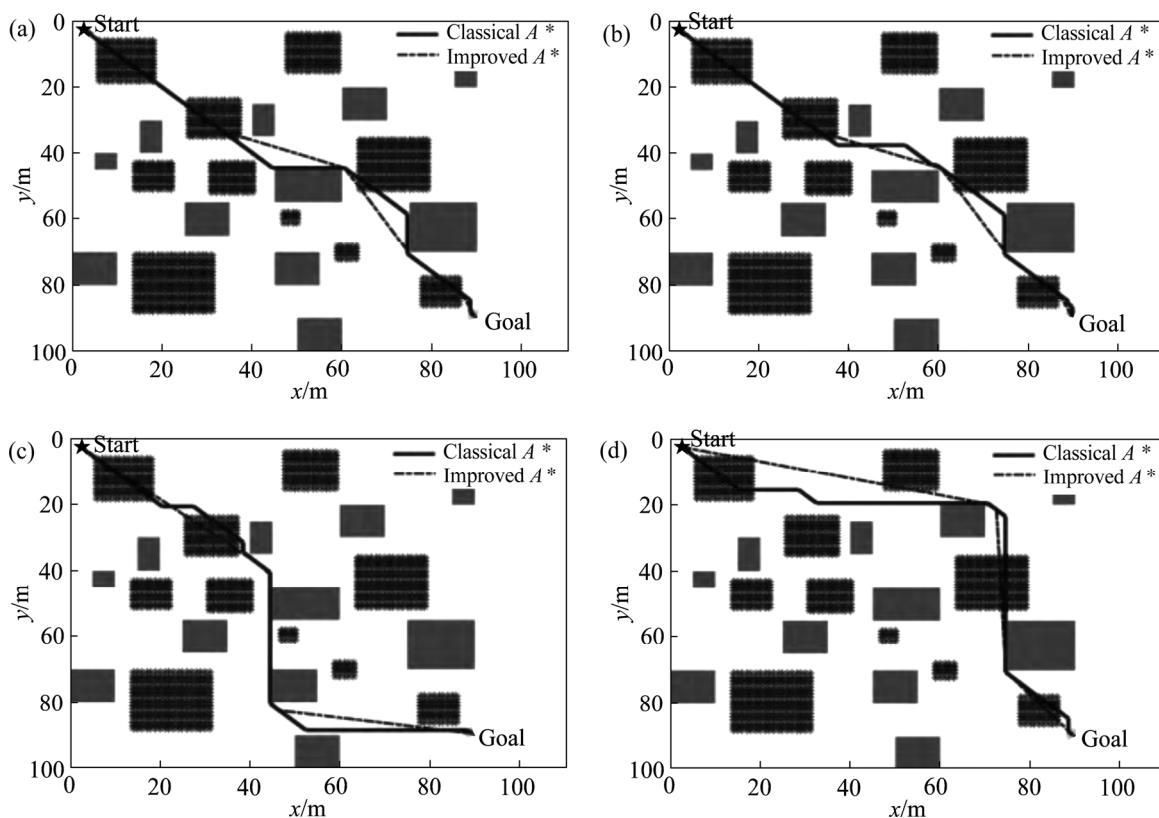


图 19 采矿车越障仿真计算结果^[71]

Fig. 19 Simulation results of mining vehicle overcoming obstacles^[71]: (a) $0 < A^* \leq 0.01$; (b) $0.01 < A^* \leq 0.02$; (c) $0.02 < A^* \leq 0.03$; (d) $0.03 < A^* \leq 0.06$

走机构通过性准则(基于均匀接地比压或接触土剪切强度参数,且忽略土流变特性)不能预测深海集矿机通过障碍的临界几何条件(如临界堑沟宽度、坡度)问题,且物理意义明确,可为深海采矿车作业的安全性评定提供理论依据。

3.2 采矿车行走牵引力

为了避免在深海稀软底质上打滑和沉陷,采矿车必须具有足够的牵引力,才能实现在复杂的海底床面上安全高效作业。通常采用理论、试验和数值仿真方法开展深海采矿车的行走牵引力研究。戴瑜

等^[74]基于车辆地面力学理论,推导了深海采矿车的牵引力计算公式:

$$\begin{aligned}
 F(i) &= F_s(i) - R_c - R_b = \\
 &\left\{ \left(A + 4hl \right) c + W \tan \varphi \left[1 + 0.64 \frac{h}{b} \arctan \left(\frac{h}{b} \right) \right] \right\} K_r \\
 &\left\{ 1 + \frac{K_\omega}{il} \left[\exp \left(-\frac{il}{K_\omega} \right) - 1 \right] - \left[\frac{e}{K_r(e-1)} - 1 \right] \right. \\
 &\left. \frac{K_\omega}{2il} \left[2 \exp \left(1 - \frac{il}{K_\omega} \right) - \exp \left(1 - \frac{il}{K_\omega} \right) - e \right] \right\} - \\
 &W \left\{ 1 + 0.64 \left[\frac{h}{b} \arctan \left(\frac{h}{b} \right) \right] \right\} (\tan f) K_r \left(\frac{K_w}{2il} \right) \\
 &\left\{ \frac{2 \left[\exp \left(1 - \frac{il}{K_\omega} \right) - e + \exp \left(\frac{il}{K_\omega} \right) - 1 \right]}{1 + \frac{4n_p^2 \pi^2 K_\omega^2}{i^2 l^2}} + \right. \\
 &\left. \frac{\exp \left(1 - 2 \frac{il}{K_\omega} \right) - e}{1 + \frac{2n_p^2 \pi^2 K_\omega^2}{i^2 l^2}} \right\} - \frac{2b}{(n+1) \left(\frac{k_c}{b} + k_f \right)^{1/n}} \cdot \\
 &\left(\frac{1.25W}{2n_w b \sqrt{p_t d_w}} \right)^{\frac{n+1}{n}} - 2b \left[\frac{1}{2} \gamma_s h^2 K_{pr} + h(qK_{pq} + cK_{pc}) \right]
 \end{aligned} \quad (13)$$

式中: b 为履带的宽度; A 为接地面积; i 为车体打滑率; l 为接地长度; P_t 为节距; h 为履齿高度; K_r 为残余剪切应力与最大剪切应力的比值; K_w 为最大剪应力对应的剪切位移; γ_s 为底质密度; n 为变形指数; c 为黏结力; φ 为内摩擦角; $\tau_{\max}$ 为剪切强度; τ_{res} 为残余剪应力; k_c 为内聚变形模量; k_ϕ 为摩擦变形模量; K_{pr} 、 K_{pq} 、 K_{pc} 为三个不同的太沙基承载力系数; n_p 为余弦分布周期数; d_w 为支重轮直径; W 为采矿车总承重力; n_w 为单条履带支重轮数。

GREBE 等^[75]提出了一种基于车辆结构参数和实际行驶数据推出土体力学参数的方法来计算陆地车辆的牵引力和行驶阻力,该方法可为深海采矿车的行走牵引力计算提供新的思路。BAEK 等^[76]通过开展含深海底质的模型轨道试验研究了底质土推力机制,并利用极限平衡法建立了底质推力预测模型(见图 20)。SCHULTE 等^[77]基于深海底质剪

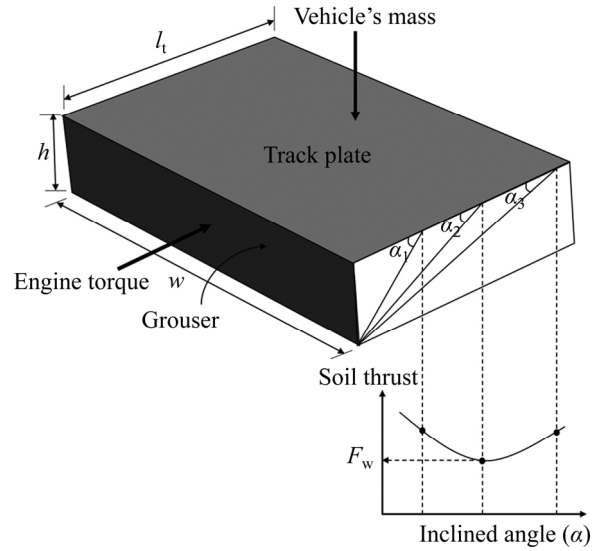


图 20 深海底质土推力预测模型^[76]

Fig. 20 Thrust prediction model of deep-sea sediment^[76]

切试验建立了其剪切本构关系,并结合采矿车的履带参数和底质特性,计算了采矿车的牵引力。

WONG 等^[78]提出了在不考虑齿高效应的情况下,根据底质扭转试验测得的剪切强度来确定采矿车的牵引力:

$$F = 2B \int_0^L \left[c + q(x) \tan \alpha \right] \left[1 - \exp \left(-\frac{S_x}{K} \right) \right] dx \quad (14)$$

式中: B 为圆形接触面的宽度; S_x 为剪切位移; c 为黏结力; $q(x)$ 为正向压力; α 为抗剪角。

WANG 等^[79]通过分析履带式采矿车模型剪切试验结果(见图 21),提出了饱和软塑土的经验模型(SSP 模型),推导出牵引力计算公式并得到了试验验证:

$$\begin{aligned}
 F_T &= k_{pm} \left\{ \frac{K_\omega}{2iL} \left[\exp \left(-\frac{iL}{K_\omega} \right) - 2c_{pm} \right]^2 - (2c_{pm} - 1) \right. \\
 &\left. \left[1 + (2c_{pm} - 1) \frac{K_\omega}{2iL} \right] \right\} \times (B + 2h)L \times \tau_{\max} + \\
 &k_{pr} \left\{ -\frac{K_\omega}{2iL} \left[\exp \left(-\frac{iL}{K_\omega} \right) - 2c_{pr} \right]^2 - (2c_{pr} - 1) \right. \\
 &\left. \left[1 + (2c_{pr} - 1) \frac{K_\omega}{2iL} \right] \right\} \times (B + 2h)L \times \tau_{\text{res}}
 \end{aligned} \quad (15)$$

式中: k_{pm} 为驼峰部分的调整系数; k_ω 为最大剪应力下剪切位移; i 为滑移率; L 为履带接触长度; c_{pm} 为驼峰区软塑变形损失引起的修正系数; B 为单轨宽度; h 为履齿深度; k_{pr} 为残余区软塑性变形损失

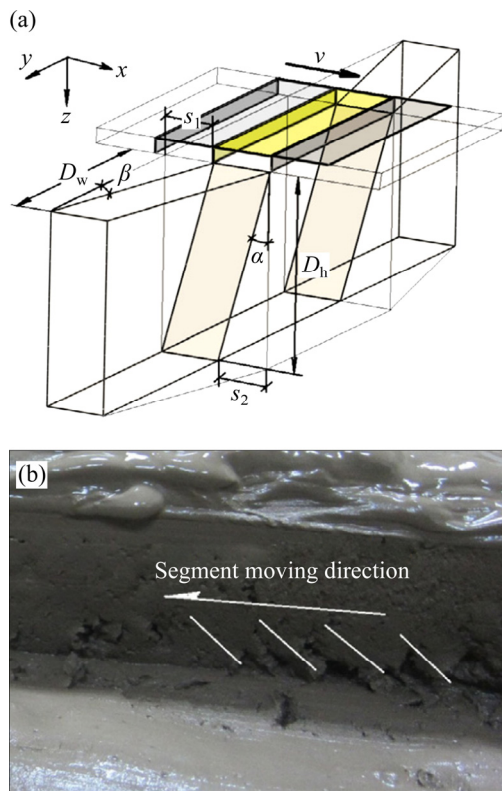


图 21 履带式采矿车模型剪切试验^[79]

Fig. 21 Shear test of tracked mining vehicle model(a) and physical image(b)^[79]

引起的修正系数； c_{pr} 为残余部分调整系数。

为了改进采矿车结构参数以提高其牵引力，LI 等^[80]通过理论分析得到了单履带模型的牵引力计算公式，结果表明牵引力随滑移率与履齿高度之比的增大而增大，可通过优化履带结构参数来提高单履带牵引性能。JANARTHANAN 等^[81]和 MURO^[82]采用 ABAQUS 软件对不同形状(插销式、三角形和渐开线形)和尺寸的履带式采矿车模型进行数值模拟，分析了履齿参数对采矿车牵引性能和土体位移的影响，得到了插销式履齿具有更大的牵引力。HONG 等^[83]通过开展三角形和叶片型履齿形状的采矿车在稀软底质上的通过性能试验，分析了其下沉量和牵引力，发现履齿高度的增加可有效地增加牵引力但会造成较大的滑沉，叶片式履齿则需要确定合适的牵引角才能提高牵引力。CHOI 等^[84]通过开展履带式采矿车模型在深海模拟土上的牵引力试验，分析了履齿跨距、车辆重心、行驶速度等因素对其牵引性能的影响，建议采用履齿为钝角且重心向前的轻质采矿车。

上述关于采矿车牵引力的计算，均将深海稀软

底质的力学性能视为与时间无关，尚未考虑其与时间相关的流变特性。本课题组针对工程中常用的两类履带板(尖三角和厚三角)进行履带板-底质土接触力学分析(见图 22)，基于深海模拟土压-剪耦合流变特性和履带板结构参数，推导出尖三角(见式(16))和厚三角(见式(17))履带板的牵引力计算公式：

$$F_{D1} = B(L_1 + L_2 + L_3 + L_4 - L_5 \cos \alpha_2)c + (J_{n1} + J_{c1}sz)\left(\frac{BL_1}{\cos \alpha_1} + \frac{BL_5}{\sin \alpha_2}\right) - B\left[J_{n2}z + \frac{J_{c2}S}{2}(z^2 + 2zz_0)\right] \quad (16)$$

$$F_{D2} = Bh\left(\frac{J_{n1} + J_{c1}sz}{\cos \theta} - ch \tan \theta\right) - \frac{2Bh}{\cos \theta}\left[J_{n2}z + \frac{J_{c2}S}{2}(z^2 + 2zz_0) + c \cos \theta\right] \quad (17)$$

式中： $L_1 \sim L_5$ 分别为履带的部分长度； B 为履带间距； s 为履带左移距离； θ 为履齿半角； h 为高度、 α_1 为倾角 1； α_2 倾角 2； c 为内聚力； J_1 和 J_2 为剪切流变柔度； J_{n1} 和 J_{n2} 为常规项； J_{c1} 和 J_{c2} 为耦合项； z 为

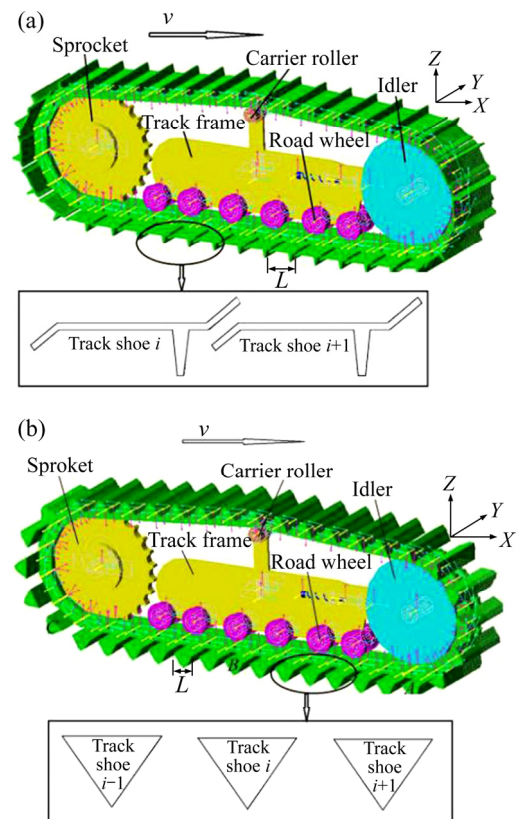


图 22 两类履带板结构模型^[85]

Fig. 22 Two types of track-plate structure models: (a) Pointed triangle; (b) Thick triangle^[85]

下沉深度。

分析了牵引速度、履齿形状和高度、履带板间距等因素对牵引力的影响规律;建立了以最大牵引力和最小自重为目标函数的履带板结构优化模型并得到了优化参数,通过自行研制的两类履带板牵引力试验结果,验证了履带板牵引力计算公式和优化模型的有效性。采矿车虚拟样机(见图23)行走性能的RecurDyn仿真计算结果表明^[86-87]:优化后的两类履带板比优化前的初始履带板具有更小的流变沉陷和更大的牵引力(见图24和25),且厚三角履带板具有更大的流变沉陷降低量,尖三角履带板能维持较长时间的较大牵引力。通过比较不同深海底质本构模型下履带式采矿车的流变沉陷和牵引力(见图26),得到流变沉陷大小顺序为:压-剪耦合流变本构模型计算的流变(见式(11))>压缩流变本

构模型计算的流变(见式(7))>弹塑性本构模型计算的流变(未考虑流变特性,见式(3)~(4));牵引力大小顺序为:压-剪耦合流变本构模型计算的牵引力<

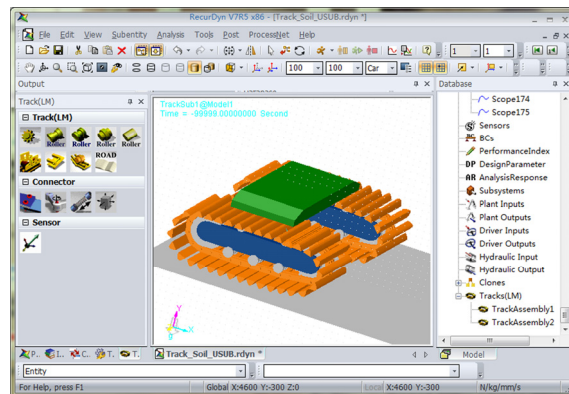


图23 履带式集矿机样机模型^[46]

Fig. 23 Prototype model of tracked mining vehicle^[46]

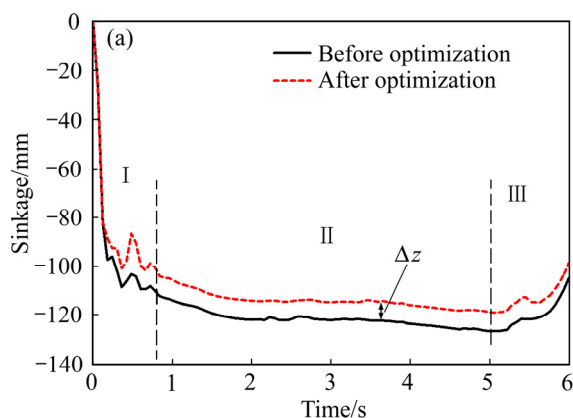


图24 优化前后两类履带板的沉陷($v=0.5$ m/s)^[72]

Fig. 24 Sinkage of two types of track plates before and after optimization ($v=0.5$ m/s): (a) Pointed triangle; (b) Thick triangle^[72]

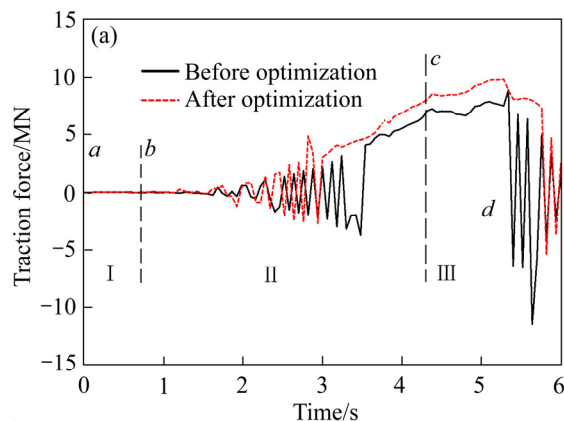
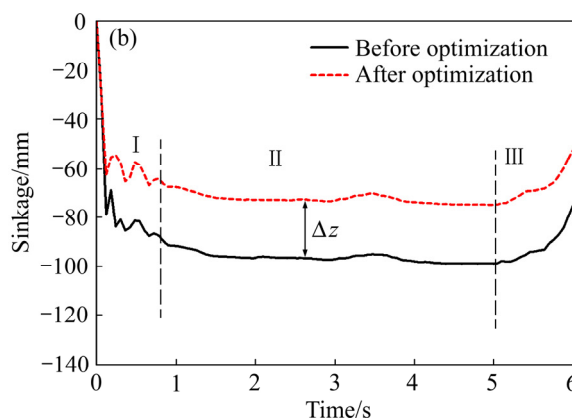
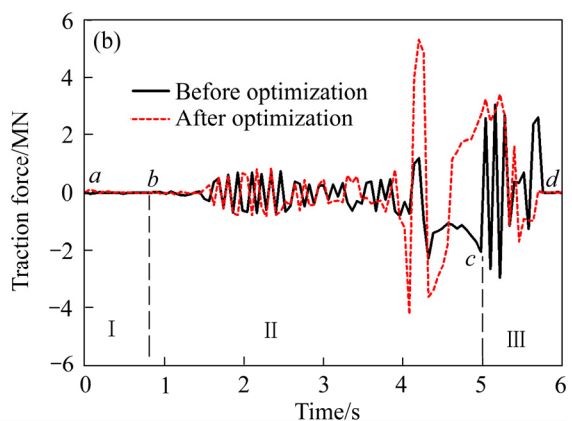


图25 优化前后两类履带板的牵引力($v=0.5$ m/s)^[72]

Fig. 25 Traction force of two types of track plates before and after optimization ($v=0.5$ m/s): (a) Pointed triangle; (b) Thick triangle^[72]



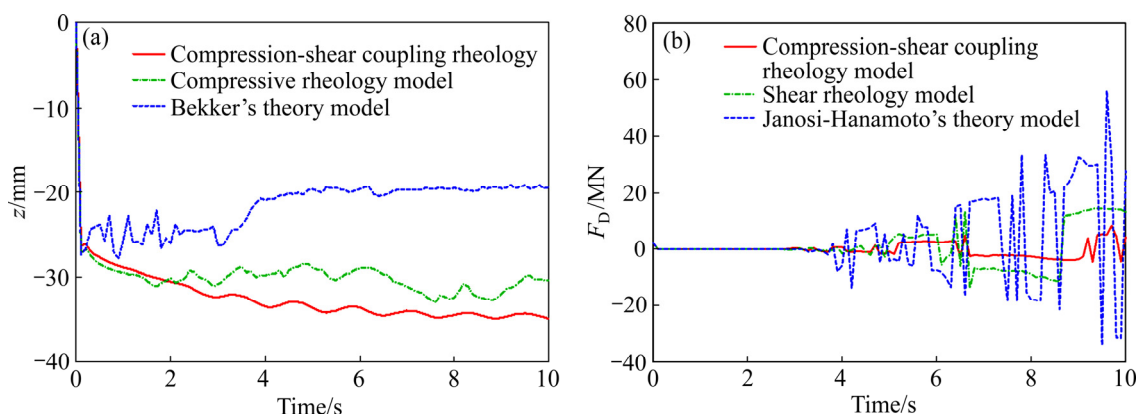


图 26 不同本构模型下履带式集矿机的沉陷和牵引力($v=0.5$ m/s)

Fig. 26 Sinkage and traction of tracked mining vehicles under different constitutive models($v=0.5$ m/s): (a) Sinkage; (b) Traction

压缩流变本构模型计算的牵引力 < 弹塑性本构模型计算的牵引力, 即采用常规的弹塑性本构模型计算得到的深海采矿车流变沉陷量偏小、牵引力偏大, 实际上高估了采矿车的行走稳定性。因此, 基于深海底质流变特性的采矿车牵引力计算方法可为深海采矿车行走安全性评定和结构优化设计提供重要的理论依据。

4 总结与展望

我国自 2001 年在国际海底区域获得第一块专属勘探矿区——东太平洋多金属结核勘探矿区后, 于 2011 年、2013 年、2015 年、2019 年相继获得了西南印度洋多金属硫化物勘探矿区、西太平洋富钴结壳勘探矿区、东太平洋多金属结核勘探矿区、东太平洋海底多金属结核勘探矿区等四块专属勘探矿区, 已成为目前在国际海底区域拥有最多具有资源专属勘探权和优先采矿权的国家^[88]。尽管深海矿产储量巨大且品位高, 但底质环境(如沉积物、固体矿物等)和地形地貌(如斜坡、沟壑等)复杂、海流环境恶劣(如超高压、风浪、洋流且方向不确定), 因此开采难度极大, 对采矿作业设备提出了极高要求^[89]。

目前, 深海矿产资源在世界范围内尚未形成商业化开采。面对我国经济快速发展的矿产资源重大需求以及建设海洋强国的战略需求, 勘探和开发深海矿产资源迫在眉睫。系统深入地开展深海稀软底质特性与采矿车行走运动性能的研究, 对采矿车结

构的优化设计及采矿系统的高效安全作业具有重要的理论意义和工程应用价值。

针对目前深海稀软底质特性与采矿车行走运动性能的研究现状, 提出以下未来研究方向的建议。

1) 现有关于深海稀软底质特性及本构关系的研究, 通常采用原位测试、海底采集沉积物样本的现场或实验室测试来研究其矿物成分和微观结构、基本物理(如比表面积、粒径、孔隙比等)和力学特性(如压缩弹性模量、黏聚力、内摩擦角、贯入阻力等), 其流变特性通过配制具有与深海沉积物相似特性的模拟土开展静态的压缩、剪切和压-剪耦合蠕变试验以及动压陷蠕变试验, 并基于元件模型、内时理论、分数阶导数理论等方法建立相应的流变本构模型, 但研究深海底质的三维动态流变特性偏少。深海采矿车在复杂的海底和海流环境下持续采矿作业, 不可避免地会对深海底质传递复杂的动荷载, 应深入开展深海底质三维动态流变特性及其流变本构关系的研究, 为采矿车行走特性分析及其牵引力计算提供理论支撑。

2) 现有关于采矿车行走性能研究, 多采用深海模拟土与不同履齿截面形式的履带板接触力学模型开展履带式采矿车行走运动分析(含直行、转弯、越障等), 基于深海模拟土的静态本构关系(如与时间无关的弹塑性本构, 与时间相关的压缩、剪切、压-剪等耦合流变本构), 推导出采矿车牵引力的计算公式, 并分析了接地比压分布、运动速度、结构参数(如履带板齿高、间距和接地长度)等因素对采

矿车牵引力的影响规律,但尚未考虑深海底质的三维动态流变性能、采矿工艺参数以及软管空间运动形态等对采矿车牵引力的影响。采矿车越障通过性准则(含爬坡、沟壑)多数未考虑深海底质流变特性、或者考虑了底质流变但局限于二维越障问题。因此,应综合考虑深海底质三维动态流变性能、采矿工艺参数以及软管空间运动形态等影响因素,提出深海采矿车牵引力计算方法并建立基于三维动流变压陷能量转化的采矿车越障通过性准则,为深海采矿车作业安全评定及其结构优化设计提供可靠依据。

3) 现有关于深海采矿车结构优化设计研究,通常采用深海底质本构关系来建立以最大牵引力为目标的采矿车履带板结构优化模型并得到其优化参数,仅考虑了深海采矿车行走对复杂海底环境的影响,较少考虑采矿作业对海洋环境的影响。当采矿车行走机构和水力捕捉系统对海底矿物收集、分离、提升等作业时,将会扰动或卷走底质沉积物而对海洋生态环境造成破坏(如海底动物群被压碎和分散、或被沉积物羽状流沉淀而窒息和埋没等)。因此,应针对不同的海底矿物赋存状态及其采矿工艺,深入研究深海采矿对海洋环境的影响规律,为构建环境友好型的深海采矿作业系统及采矿车结构优化设计提供科学依据。

深海采矿属于交叉性很强的多学科复杂问题,如何不断加深对深海稀软底质特性的认识,以科学理论指导采矿装备的结构优化升级,实现严苛海洋环境下的高效、安全、绿色开采,促进深海矿产资源商业化开采进程,这是未来一段时间需要广大科研工作者共同努力去实现的远大目标。

REFERENCES

- [1] 李夕兵,周健,王少锋,等.深部固体资源开采评述与探索[J].中国有色金属学报,2017,27(6):1236-1262.
LI Xi-bing, ZHOU Jian, WANG Shao-feng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236-1262.
- [2] 李夕兵,黄麟淇,周健,等.硬岩矿山开采技术回顾与展望[J].中国有色金属学报,2019,29(9):1828-1847.
LI Xi-bing, HUANG Lin-qi, ZHOU Jian, et al. Review and prospect of mining technology in hard rock mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1828-1847.
- [3] LIANG W, ZHAO G, WU Hao, et al. Optimization of mining method in subsea deep gold mines: A case study[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(10): 2160-2169.
- [4] 刘永刚,姚会强,于淼,等.国际海底矿产资源勘查与研究进展[J].海洋信息,2014(3):10-16.
LIU Yong-Gang, YAO Hui-qiang, YU Miao, et al. Progress of international seabed mineral resources exploration and research[J]. Marine Information, 2014(3): 10-16.
- [5] 李艳.基于三维离散元管线模型的深海采矿1000 m海试系统整体联动动力学研究[D].长沙:中南大学,2009:1-2.
LI Yan. Dynamic analysis of 1000 m ocean pilot mining system based on three-dimensional discrete element method pipe model[D]. Changsha: Central South University, 2009: 1-2.
- [6] 阳宁,陈光国.深海矿产资源开采技术的现状综述[J].矿山机械,2010,38(10):4-9.
YANG Ning, CHEN Guang-guo. Status quo and development tendency of deep sea minerals mining technology[J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(10): 4-9.
- [7] 彭建平.深海多金属结核采矿环境影响分析[J].采矿技术,2020,20(4):123-127.
PENG Jian-ping. Environmental impact analysis of deep-sea polymetallic nodule mining[J]. Mining Technology, 2020, 20(4): 123-127.
- [8] 吴鸿云,陈新明,高宇清,等.西矿区深海稀软底质剪切强度和贯入阻力原位测试[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(5):1801-1806.
WU Hong-yun, CHEN Xin-ming, GAO Yu-qing, et al. In-situ shearing strength and penetration resistance testing of soft seabed sediments in western mining area[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(5): 1801-1806.
- [9] 陈秉正.“鲲龙500”采矿车履带行驶机构的研制与试验研究[J].采矿技术,2019,19(5):125-128.
CHEN Bing-zheng. Development and experimental study of the track driving mechanism of the “Kunlong 500” mining vehicle[J]. Mining Technology, 2019, 19(5): 125-128.

- [10] MURRAY J, RENARD A F. Report on deep-sea deposits based on the specimens collected during the voyage of HMS Challenger in the years 1872 to 1876[M]. London: HM Stationery Office, 1891: 1–32.
- [11] MERO J L. A preliminary report on the economics of mining and processing deep-sea manganese nodules[M]. California: Institute of Marine Resources, 1959: 14–86.
- [12] MILLER K A, THOMPSON K F, JOHNSTON P, et al. An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 4: 418.
- [13] LENG D, SHAO S, XIE Y, et al. A brief review of recent progress on deep sea mining vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 228: 108565.
- [14] MASUDA Y, CRUICKSHANK M J, MERO J L. Continuous bucket-line dredging at 12000 feet[C]//*Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*. Houston, USA: OTC, 1971: 837–841.
- [15] 刘少军, 刘畅, 戴瑜. 深海采矿装备研发的现状与进展[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(2): 8–18.
LIU Shao-jun, LIU Chang, DAI Yu. Status and progress on researches and developments of deep ocean mining equipments[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(2): 8–18.
- [16] BATH A R. Deep sea mining technology: Recent developments and future projects[C]//*Offshore Technology Conference*. Houston, USA: OTC, 1989: 333–340.
- [17] CHUNG J S, TSURUSAKI K. Advance in deep-ocean mining systems research[C]//*The Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Cupertino, California, USA: ISOPE, 1994: 18–31.
- [18] TINSLEY C. Activities and economics of existing manganese nodule mining consortia[C]//*OCEANS'78*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE, 1978: 602–605.
- [19] YAMADA H, YAMAZAKI T. Japan's ocean test of the nodule mining system[C]//*The Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Cupertino, California, USA: ISOPE, 1998: 13–19.
- [20] WELLING C G. An advanced design deep sea mining system[C]//*Offshore Technology Conference*. Houston, USA: OTC, 1981: 247–255.
- [21] CHUNG J S. Deep-ocean mining technology: Development II development II[C]//*Sixth ISOPE Ocean Mining Symposium*. Cupertino, California, USA: ISOPE, 2005: 1–6.
- [22] HANDSCHUH R, GREBE H, PANTHEL J, et al. Innovative deep ocean mining concept based on flexible riser and self-propelled mining machines[C]//*Proceedings of the 4th ISOPE Ocean Mining Symposium*. Cupertino, California, USA: ISOPE, 2001: 99–107.
- [23] DEEPAK C R, SHAJAHAN M A, ATMANAND M A, et al. Developmental tests on the underwater mining system using flexible riser concept[C]//*Proceedings of the 4th Ocean Mining Symposium*. Cupertino, California, USA: ISOPE, 2001: 94–98.
- [24] HONG S, KIM H, CHOI J, et al. A self-propelled deep-seabed miner and lessons from shallow water tests[C]//*Proceedings of the ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. New York: ASME, 2010, 49118: 75–86.
- [25] YE U T K, YOON S M, HONG S, et al. Steering performance test of underwater mining robot[C]//*2014 Oceans-St. John's*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1–4.
- [26] DAI Y, YIN W, MA F. Nonlinear multi-body dynamic modeling and coordinated motion control simulation of deep-sea mining system[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 86242–86251.
- [27] 高心如. 全球首制 227 米深海采矿船出坞[J]. *船舶物资与市场*, 2018(2): 11.
GAO Xin-ru. The world's first 227-meter deep-sea mining vessel is docked[J]. *Marine Equipment/Materials & Marketing*, 2018(2): 11.
- [28] 杨建民, 刘磊, 吕海宁, 等. 我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 1–9.
YANG Jian-min, LIU Lei, LÜ Hai-ning, et al. Deep-sea mining equipment in China: Current status and prospect[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 1–9.
- [29] 魏定邦, 杨强, 夏建新. 深海沉积物抗剪强度影响因素及其变化规律[J/OL]. *海洋地质前沿*: 1–6[2021–07–23]. <https://doi.org/10.16028/j.1009-2722.2020.161>.
WEI Ding-bang, YANG Qiang, XIA Jian-xin. Factors influencing shear strength of deep sea sediment and its variation law[J/OL]. *Marine Geology Frontiers*: 1–6 [2021–07–23]. <https://doi.org/10.16028/j.1009-2722.2020.161>.
- [30] 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, 21(6): 47–54.
SONG Lian-qing. Geotechnical properties of oceanic

- polymetallic nodule sediments[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21(6): 47–54.
- [31] 周知进, 王贵满. 海底沉积物剪切强度的试验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2005, 20(2): 15–18.
- ZHOU Zhi-jin, WANG Gui-man. Study of the shearing strengths of marine sediment in the China's mining region[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2005, 20(2): 15–18.
- [32] KHADGE N H. Geotechnical properties of surface sediments in the INDEX area[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2000, 18(3): 251–258.
- [33] KELLER G H. Organic matter and the geotechnical properties of submarine sediments[J]. *Geo-Marine Letters*, 1982, 2(3): 191–198.
- [34] 王树仁, 阳 宁, 王贵满. 太平洋 C-C 区中国矿区深海沉积物的强度特性研究[J]. 矿冶工程, 2000(3): 21–24.
- WANG Shu-ren, YANG Ning, WANG Gui-man. Strength characteristics of deep sea deposits in China's mining region in the pacific ocean's C-C zone [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2000, 20(3): 21–24.
- [35] HERZOG K, SCHULTE E, ATMANAND M A, et al. Slip control system for a deep-sea mining machine[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2007, 4(2): 282–286.
- [36] 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 Shu-lin. Simulation and mechanical characteristics of terramechanics of the surface soil on deep-sea bed[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(11): 213–220.
- [37] 马雯波, 饶秋华, 吴鸿云, 等. 深海稀软底质土宏观性能与显微结构分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1641–1646.
- MA Wen-bo, RAO Qiu-hua, WU Hong-yun, et al. Macroscopic properties and microstructure analyses of deep-sea sediment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(6): 1641–1646.
- [38] FREEMAN T J, SCH U, TTENHELM R. A geotechnical investigation of a deep ocean site[M]. PA: ASTM International, 1990: 255–275.
- [39] BABU S M, RAMESH N R, MUTHUVEL P, et al. In-situ soil testing in the Central Indian Ocean basin at 5462-m water depth[C]//Tenth ISOPE ocean mining and gas hydrates symposium Cupertino. California, USA: ISOPE, 2013: 190–197.
- [40] CHOI J, HONG S, CHI S, et al. Probability distribution for the shear strength of seafloor sediment in the KR5 area for the development of manganese nodule miner[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(17/18): 2033–2041.
- [41] BEKKER M G. Theory of land locomotion[M]. Michigan: University of Michigan Press, 1956: 7–14.
- [42] 刘少军, 王国庆. 履带式试验车软地面行走性能仿真分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(S2): 285–288.
- LIU Shao-jun, WANG Guo-qing. Simulation and analysis of walking performance of tracked test vehicle tracking on soft road[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(S2): 285–288.
- [43] WU H, HE J, CHEN X, et al. Establishment of the deep-sea soft sediments shearing strength-shearing displacement model[J]. *Modern Applied Science*, 2009, 4(1): 21–27.
- [44] 马雯波. 深海稀软底质土蠕变特性研究及履带式集矿机履齿结构优化[D]. 长沙: 中南大学, 2014: 23–64.
- MA Wen-bo. Study on rheological properties of deep-sea sediment and grouser structure optimization for deep-sea mining machine[D]. Changsha: Central South University, 2014: 23–64.
- [45] 马雯波, 饶秋华, 冯 康, 等. 深海稀软底质模拟土三轴压缩蠕变模型的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(12): 4342–4347.
- MA Wen-bo, RAO Qiu-hua, FENG Kang, et al. Experimental study on triaxial compressive creep model of simulative soil for deep-sea sediment[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(12): 4342–4347.
- [46] XU F, RAO Q, ZHANG J, et al. Compression-shear coupling rheological constitutive model of the deep-sea sediment[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2018, 36(3): 288–296.
- [47] QI C, RAO Q, LIU Q, et al. Traction rheological properties of simulative soil for deep-sea sediment[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, 37(1): 62–71.
- [48] MA W, RAO Q, XU F, et al. Impact compressive creep characteristics of simulative soil for deep-sea sediment[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2016, 34(4): 356–364.
- [49] HERRMANN H. Trafficability and performance analyses for a deep ocean running gear module for an undersea vehicle[C]//OCEANS'78. Los Alamitos, CA, USA: IEEE,

- 1978: 723–727.
- [50] KIM H W, HONG S, CHOI J S. Comparative study on tracked vehicle dynamics on soft soil: Singlebody dynamics vs. multibody dynamics[C]//Proceedings of the 5th ISOPE Ocean Mining Symposium. Cupertino, California, USA: ISOPE, 2003: 132–138.
- [51] 孙海舰, 何震, 冯迎宾, 等. 海底履带采矿车打滑控制研究[J]. 机械设计, 2019, 36(12): 96–100.
- SUN Hai-jian, HE Zhen, FENG Ying-bin, et al. Research on slip control of the seabed tracked mining vehicle[J]. Machinery, 2019, 36(12): 96–100.
- [52] 彭建平, 彭赛锋, 程阳锐. 外力对多金属结核采矿车运动性能影响的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(6): 140–143.
- PENG Jian-ping, PENG Sai-feng, CHENG Yang-rui. Experimental study on the influence of external force on movement performance of polymetallic nodule mining vehicle[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(6): 140–143.
- [53] KITANO M, KUMA M. An analysis of horizontal plane motion of tracked vehicles[J]. Journal of Terramechanics, 1977, 14(4): 211–225.
- [54] SHILLER Z, SERATE W, HUA M. Trajectory planning of tracked vehicles[C]//Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation. Los Alamitos, CA, USA: IEEE, 1993: 796–801.
- [55] OH J W, LEE C H, HONG S, et al. Study on optimum curve driving of four-row tracked vehicle in soft ground using multi-body dynamics[J]. Journal of Ocean Engineering and Technology, 2014, 28(2): 167–176.
- [56] DAI Y, LIU S. Theoretical design and dynamic simulation of new mining paths of tracked miner on deep seafloor[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(4): 918–923.
- [57] UMARU S, LIU S, HAN Q. Modeling of miner track system during steering motion[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(2): 502–510.
- [58] KIM H, HONG S, CHOI J, et al. Dynamic analysis of underwater tracked vehicle on extremely soft soil by using Euler parameters[C]//Proceedings of The Sixth ISOPE Ocean Mining Symposium. Cupertino, CA, USA: ISOPE, 2005: 141–148.
- [59] HONG S, KIM H, CHOI J. Transient dynamic analysis of tracked vehicles on extremely soft cohesive soil[C]//Proceedings of the 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. Cupertino, California, USA: ISOPE, 2002: 100–107.
- [60] 刘伟, 吴鸿云, 江敏, 等. 海底自行式四履带车的差速转向性能研究[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(11): 81–85.
- LIU Wei, WU Hong-yun, JIANG Min, et al. Research on the differential steering performance of self-propelled four-tracked vehicle using in seabed[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(11): 81–85.
- [61] 张海宁. 履带采矿车海底斜坡地形转向控制算法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 10–29.
- ZHANG Hai-ning. The research of turning contr on the tracked vehicle in the deep-sea slope[D]. Changsha: Central South University, 2010: 10–29.
- [62] 邹吉炎. 悬臂式六轮移动机器人越障性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006: 18–34.
- ZOU Ji-yan. Research on the performance of cantilevered six-wheeled mobile robot for obstacle crossing[D]. Changsha: Central South University, 2006: 18–34.
- [63] 迟洪鹏, 姜勇. 海底采矿车壕沟越障通过性分析与仿真研究[J]. 机械制造, 2017, 55(8): 28–30.
- CHI Hong-peng, JIANG Yong. Analysis and simulation study on the passage of trench crossing barrier for subsea mining vehicle[J]. Machinery, 2017, 55(8): 28–30.
- [64] 刘金辉, 谷炜, 孟兆磊, 等. 海底采矿车斜坡越障通过性分析与仿真研究[J]. 机械制造, 2018, 56(11): 56–59.
- LIU Jin-hui, GU Wei, MENG Zhao-lei, et al. Analysis and simulation of slope passage of subsea mining vehicle over barrier[J]. Machinery, 2018, 56(11): 56–59.
- [65] 吴国锐. 深海履带式钴结壳采矿车工作稳定性仿真研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007: 46–50.
- WU Guo-rui. Simulation study on the working stability of deep-sea crawler cobalt crust mining vehicle[D]. Changsha: Central South University, 2007: 46–50.
- [66] HUANG Z H, LIU S J, XIE Y. Obstacle performance of cobalt-enriching crust wheeled mining vehicle[J]. Journal of Central South University of Technology, 2006, 13(2): 180–183.
- [67] GUO X, JIANG Y, LI J, et al. Analysis and simulation research on adaptive obstacle climbing motion of seabed mining vehicle[C]//2017 Chinese Automation Congress (CAC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 2296–2299.
- [68] 李力, 张敏, 双志. 基于ANFIS的海底采矿车行走

- 控制[J]. 控制工程, 2011, 18(5): 660–663.
- LI Li, ZHANG Min, SHUANG Zhi. Moving control of sea-bed mining vehicle based on ANFIS[J]. Control Engineering of China, 2011, 18(5): 660–663.
- [69] 双志, 李力, 张敏. 利用 LabVIEW 的海底采矿车行走控制系统研究[J]. 现代制造工程, 2011(6): 16–20.
- SHUANG Zhi, LI Li, ZHANG Min. Research on driving control system of seafloor mining vehicle based on LabVIEW[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2011(6): 16–20.
- [70] 徐立. 深海履带车行驶控制技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018: 31–59.
- XU Li. Research on the driving control technology of deep-sea tracked vehicle[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2018: 31–59.
- [71] 陈昱衡, 吴鸿云, 郭旭, 等. 基于采矿车动力学分析的改进 A* 算法全局路径规划[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(2): 170–177.
- CHEN Yu-heng, WU Hong-yun, GUO Xu, et al. The global path planning of improved A* algorithm based on dynamic analysis of mining vehicle[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(2): 170–177.
- [72] XU F, RAO Q, MA W. Track shoe structure optimization of deep-sea mining vehicle based on new rheological calculation formulae of sediment[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2019, 47(4): 479–496.
- [73] 许锋, 饶秋华. 深海底质流变特性与履带式集矿机通过性准则研究[C]//中国力学大会论文集(CCTAM 2019). 北京: 中国力学学会, 2019: 2639–2641.
- XU Feng, RAO Qiu-hua. Study on rheological properties of deep-sea substrate and passability criterion of crawler collector[C]//Proceedings of the China Mechanics Conference(CCTAM 2019). Beijing: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2019: 2639–2641.
- [74] 戴瑜, 刘核, 张滔, 等. 海底履带式采矿车行走牵引通过性能研究[J]. 中国科技论文, 2015, 10(10): 1203–1208.
- DAI Yu, LIU He, ZHANG Tao, et al. Research on traction trafficability of seafloor tracked mining vehicle[J]. China Sciencepaper, 2015, 10(10): 1203–1208.
- [75] GREBE H, SCHULTE E S. Determination of soil parameters based on the operational data of a ground operated tracked vehicle[C]//Proceedings of the 6th ISOPE Ocean Mining Symposium. Cupertino, California, USA: ISOPE, 2005: 149–156.
- [76] BAEK S H, SHIN G B, CHUNG C K. Experimental study on the soil thrust of underwater tracked vehicles moving on the clay seafloor[J]. Applied Ocean Research, 2019, 86: 117–127.
- [77] SCHULTE E, SCHWARZ W. Simulation of tracked vehicle performance on deep sea soil based on soil mechanical laboratory measurements in bentonite soil[C]//Eighth ISOPE Ocean Mining Symposium. Cupertino, California, USA: ISOPE, 2009: 1–9.
- [78] WONG J Y, GARBER M, PRESTON-THOMAS J. Theoretical prediction and experimental substantiation of the ground pressure distribution and tractive performance of tracked vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Transport Engineering, 1984, 198(4): 265–285.
- [79] WANG M, WU C, GE T, et al. Modeling, calibration and validation of tractive performance for seafloor tracked trencher[J]. Journal of Terramechanics, 2016, 66: 13–25.
- [80] LI J, LIU S, DAI Y. Effect of grouser height on tractive performance of tracked mining vehicle[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, 39(7): 2459–2466.
- [81] JANARTHANAN C, GOPKUMAR K, SUNDARAMOORTHY V, et al. Influence of grouser geometrical parameters of deep-sea crawler vehicle on soft clays[C]//Proceedings of the Fourth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2018). Singapore: Springer, 2019: 899–912.
- [82] MURO T. Grouser effect on tractive performance of a bull-dozer running on a superweak marine sediment[C]//Proceedings of 2nd Asia-Pacific conference. North Carolina: ISTVS, 1988: 355–366.
- [83] HONG S, CHOI J, HONG S, et al. Experimental study on grouser shape effects on trafficability of extremely soft seabed[C]//Fourth ISOPE Ocean Mining Symposium. Szczecin, Poland, Cupertino, California, USA: ISOPE, 2001: 115–121.
- [84] CHOI J S, HONG S, KIM H W, et al. An experimental study on tractive performance of tracked vehicle on cohesive soft soil[C]//Proceedings of the 5th ISOPE Ocean Mining Symposium. Cupertino, California, USA: ISOPE, 2003: 15–19.

- [85] 许 锋. 基于深海稀软底质压-剪流变分析的履带式集矿机行走特性及结构优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2017: 25-90.
- XU Feng. Moving performance and structural optimization of tracked mining vehicle based on compression-shear rheological property of deep-sea soft sediment[D]. Changsha: Central South University, 2014: 25-90.
- [86] XU F, RAO Q H, MA W B. Turning traction force of tracked mining vehicle based on rheological property of deep-sea sediment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(6): 1233-1240.
- [87] XU F, RAO Q, MA W. Predicting the sinkage of a moving tracked mining vehicle using a new rheological formulation for soft deep-sea sediment[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2018, 36(2): 230-237.
- [88] 石学法, 符亚洲, 李 兵, 等. 我国深海矿产研究: 进展与发现(2011—2020)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(2): 305-318.
- SHI Xue-fa, FU Ya-zhou, LI Bing, et al. Research on deep-sea minerals in China: Progress and discovery (2011—2020)[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(2): 305-318.
- [89] ZHU X, SUN L, LI B. Dynamic analysis of vessel/riser/equipment system for deep-sea mining with RBF neural network approximations[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(2): 174-192.

Research progress on characteristics of deep-sea soft sediment and walking performance of mining vehicle

RAO Qiu-hua¹, LIU Ze-lin¹, XU Feng², HUANG Wei¹, MA Wen-bo³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. School of Mathematics and Physics, University of South China, Hengyang 421001, China;

3. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: The rich mineral resources in deep-sea area are the most important alternative resource for land ores in the 21st century. Increasing the exploitation and utilization of the deep-sea mineral resources has become an important choice for the sustainable development of the global economy and a major strategic demand for China to build a marine power. The walking performance of mining vehicle on the deep-sea soft sediment has an important impact on the safety and stability of deep-sea mineral resources mining. In this paper, the development of the deep-sea mining methods and mining vehicles were reviewed and the basic physical and mechanical properties of deep-sea soft sediment, especially its rheological properties and constitutive relationship, were summarized. Besides, the research progress and main problems of the mining-vehicle walking kinetic characteristics and traction force were analyzed, and the future research direction of the walking performance and structural optimization of the deep-sea mining vehicle were proposed. It can provide a theoretical basis for designing an environment-friendly deep-sea mining system.

Key words: deep-sea mining; mining vehicle; soft sediment rheology; constitutive relationship; kinetic characteristics; traction force; structural optimization design

Foundation item: Projects(51274251, 12072309) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2021-07-30; **Accepted date:** 2021-09-13

Corresponding author: RAO Qiu-hua; Tel: +86-13787265488; E-mail: raoqh@csu.edu.cn

(编辑 龙怀中)