

# 考虑力链屈服的垮落体中顶进阻力分析

肖福坤<sup>1,2</sup>, 谢 锴<sup>1,3</sup>, 劳志伟<sup>1,2</sup>, 单 磊<sup>1,3</sup>, 刘 刚<sup>1,2</sup>, 郝传波<sup>2</sup>

(1. 黑龙江科技大学 黑龙江省煤矿深部开采地压控制与瓦斯治理重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150022; 2. 黑龙江科技大学 矿业工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022; 3. 黑龙江科技大学 安全工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022)

**摘 要:** 为安全高效的通过顶管法在垮落体中构建应急救援通道, 探明顶进阻力的演变机制具有重要意义。通过结合物理相似模拟试验和数值模拟试验, 对顶管过程中顶进阻力和垮落体颗粒宏观位移的演变特征进行了分析, 并利用三维力链识别方法结合颗粒材料的力链屈服行为对顶进阻力的跌落特征进行了探讨。为进一步确定顶进阻力跌落特征的内在力学机理, 选取颗粒堆积厚度、顶管半径、粒径及有效模量为正交因素, 开展了针对顶管不同部位的顶管数值模拟试验。并在考虑力链屈服行为的基础上, 结合顶进阻力跌落、接触失效、配位数突降、颗粒弹性势能释放和力链长度变化等顶进阻力及颗粒宏观参数的变化特征进行了研究。结果表明: 顶管过程中颗粒的宏观位移主要集中在顶管切口斜上方, 且颗粒内存在较明显、连续的剪切滑移带, 顶管阻力的跌落现象与局部范围内的颗粒失稳滑移和力链屈服行为相关联; 顶进阻力跌落频率与管径和有效模量呈正相关关系, 与颗粒厚度和粒径呈负相关关系, 顶管切口试验的跌落频率明显大于顶管外壁试验, 且顶进阻力的循环上升-跌落特征具有较高的相似性; 力链长度及力链有效长度随着上覆颗粒厚度及粒径的增加而增加, 扩大了力链影响范围, 并进一步导致屈服接触分布范围、配位数变化幅度、力链压曲变形程度及弹性势能增加幅度的增加; 垮落体在顶推作用下的力链屈服和解卡滑移, 是颗粒内弹性势能释放、长力链分解的主要原因; 顶管上方沿剪切面错动的颗粒在重力引导下的迅速失稳、跌落和堆积, 是导致该部分颗粒弹性势能释放对顶管阻力整体影响较小的原因。

**关键词:** 顶管; 顶进阻力; 力链屈服; 救援通道; 垮落体

**中图分类号:** TD771 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)01-0281-16

## Jacking resistance in collapsed body considering buckling of force chain

XIAO Fukun<sup>1,2</sup>, XIE Kai<sup>1,3</sup>, LAO Zhiwei<sup>1,2</sup>, SHAN Lei<sup>1,3</sup>, LIU Gang<sup>1,2</sup>, HAO Chuanbo<sup>2</sup>

(1. Heilongjiang Ground Pressure and Gas Control in Deep Mining Key Laboratory, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin 150022, China; 2. School of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin 150022, China; 3. School of Safety Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin 150022, China)

**Abstract:** In order to establish an effective and secure emergency rescue channel within a collapsed structure using the pipe jacking method, understanding the evolution mechanism of jacking resistance is crucial. The evolution characteristics of the jacking resistance and the macroscopic displacement of the collapsed particles during pipe jacking process were analyzed by physical similarity simulation test and numerical simulation test, and the drop characteristics of the jacking resistance were discussed by using 3D force chain identification method and the force chain buckling behavior of the particle

收稿日期: 2024-01-13 策划编辑: 郭晓伟 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0061

基金项目: 黑龙江省自然科学基金重点资助项目 (ZD2021E006); 国家自然科学基金面上资助项目 (52074110, 52174075)

作者简介: 肖福坤 (1971—) 男, 辽宁西丰人, 教授, 博士。E-mail: xiaofukun1@usth.edu.cn

引用格式: 肖福坤, 谢锴, 劳志伟, 等. 考虑力链屈服的垮落体中顶进阻力分析[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 281-296.

XIAO Fukun, XIE Kai, LAO Zhiwei, et al. Jacking resistance in collapsed body considering buckling of force chain[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 281-296.



移动阅读

material. In order to further determine the intrinsic mechanical mechanism of the jacking resistance drop characteristics, the particle stacking thickness, pipe radius, particle size and effective modulus were selected as orthogonal factors, and the numerical simulation test at different parts of the pipe were carried out. On the basis of the force chain buckling behavior, the change characteristics of the jacking resistance and the macroscopic and microscopic parameters of the particles, such as jacking resistance drop, contact failure, sudden drop in coordination number, particle elastic potential energy release and force chain length change, were studied. The results show that: The macro-displacement of particles primarily occurs around the oblique top of the pipe jacking cut, where a distinct and continuous shear slip zone emerges within the particles. The decrease in jacking resistance is associated with the unstable slip of particles and the localized buckling behavior of force chains. The frequency of dropping jacking resistance positively correlates with pipe diameter and effective modulus, while negatively correlating with particle thickness and size. Notably, the dropping frequency observed in pipe jacking cut tests is higher than that in outer wall tests, and both exhibit cyclic rising-falling patterns with high similarity. As the thickness and size of the overlying particles increase, the length and effective length of force chains also increase. This extension expands the reach of force chains, leading to a broader distribution range of buckling contacts, changes in coordination numbers, degrees of buckling deformation within force chains, and increases in elastic potential energy. The buckling and slip of force chains within the collapsed body are key factors contributing to the release of elastic potential energy and the breaking down of extended force chains within particles. The rapid instability, fall, and accumulation of particles along shear planes above the pipe jacking, guided by gravity is the reason why the release of elastic potential energy of these particles has little effect on the overall resistance of the pipe jacking.

**Key words:** pipe jacking; jacking resistance; force chain buckling; rescue channel; collapsed body

## 0 引 言

巷道围岩结构在强应力作用下破碎垮落形成的离散状堆积块体,是导致巷道堵塞、应急救援无法有效开展的主要原因。为快速对被困人员开展救援工作,沿最短路径——巷道堵塞区,在垮落体中构建救援通道,是现场探明灾害情况后实施救援的首选方案<sup>[1-3]</sup>。在众多通道构建方法中,顶管法具有施工速度快、适应性强的特点<sup>[4-5]</sup>,能有效缩短救援通道构建时间,提高被困人员的生存概率。顶管过程中,顶进阻力是影响顶管速率、反映围岩稳定性的重要参量<sup>[6-7]</sup>。但由于垮落体等非连续介质与常规岩土等连续介质的力学性质具有较大差异,垮落体中顶管所受阻力无法直接参考常规岩土中的相关规律进行分析判断。因此,为提高构建救援通道的安全性和时效性,需探明垮落体中顶管时顶进阻力的演变机制。

目前对于顶管阻力的研究中,多集中于对顶管阻力的估算,如早期研究中 CHAPMAN 等<sup>[8]</sup>提出的顶力模型和 OSUMI 等<sup>[9]</sup>提出的顶进阻力经验方程。但随着对顶管法应用领域和应用场景的增加,常规顶力模型和经验方程无法完全适用<sup>[10]</sup>。因此,为提高顶进阻力估算值的精度,学者们引入管道重量<sup>[9]</sup>、土体法向应力<sup>[11]</sup>、岩土残余摩擦角<sup>[12]</sup>和力拱折减系数<sup>[13]</sup>等变量对顶力模型进行完善。以上对于顶进阻力的研究大多是针对管壁摩擦阻力,迎面阻力常被忽略或当成

固定值计算。但通过孙潇昊<sup>[14]</sup>和王俊等<sup>[15]</sup>的研究可知,开挖面支护力的大小决定了顶管前方岩土的稳定性和,对迎面阻力的合理估算能有效控制岩土的变形破坏,降低围岩上表面的沉降<sup>[16]</sup>。因此,万少锋<sup>[17]</sup>和刘克奇等<sup>[18]</sup>分别在考虑滑移线场和力拱效应的基础上,针对管道掌子面的破坏特征和支护力极值进行了理论计算和试验分析。以上对于迎面阻力和管壁摩擦阻力的研究大多集中于具有较好连续性的岩土介质,对非连续介质中顶进阻力的研究也局限于砂土<sup>[19]</sup>等小粒径( $\leq 10$  mm)离散颗粒,对垮落体等大颗粒中顶进阻力的研究则相对空缺。

归纳前人的研究可知,管土间的迎面阻力及摩擦阻力均由管道受到的法向支撑力及管土间摩擦系数决定<sup>[20]</sup>,即顶进阻力与顶管前岩土的力学性质和力学结构及顶管后岩土的稳定性的相关性<sup>[21]</sup>。由于压密岩土等介质具有较好的连续性和稳定性,顶管推力作用下的围岩破坏范围有限<sup>[22]</sup>,顶进阻力大小随管道顶进的发展具有较好的规律性。而垮落体为在重力作用下形成的呈较松散状态的自然堆积体<sup>[23-25]</sup>,其内部颗粒间缺乏有效黏结作用<sup>[26]</sup>,且颗粒间存在较大孔隙率<sup>[27]</sup>,垮落体在同等载荷作用下更易发生较大范围的结构破坏和失稳滑移<sup>[28]</sup>,即顶进阻力易随着堆积体失稳而发生较大波动。因此,为探明垮落体中顶管时顶进阻力的演变规律,需结合垮落体等颗粒材料的力学特性进行研究。

垮落体等颗粒材料作为生产生活中常见的一类物质形态,其力学性质和力学行为与常规的固体材料、液体材料和气体材料均具有较大的差异,单一的固体、流体力学理论均不能有效的对其进行描述<sup>[29-31]</sup>,且在不同的受力和运动状态下,会呈现出不同相态(固体、液体及气体)的力学现象<sup>[32]</sup>。其中,当颗粒材料的体积分数较大,且颗粒间以连续力链形成稳定结构时,颗粒材料的整体力学表征类似固体材料<sup>[33]</sup>。这一状态下的颗粒材料,在外力作用下的屈服过程类似于固体材料的剪切破坏过程<sup>[34]</sup>。而自然堆积状态下的垮落体基本呈准静态流(类固体)<sup>[35]</sup>,顶管过程中颗粒无较大范围位移速率时,垮落体力学状态及顶进阻力可参考固体结构进行分析。在孙其诚<sup>[36]</sup>、杨柳等<sup>[37]</sup>的研究中发现,准静态状态下的颗粒材料中的应力主要通过占比较少的力链传递,力链结构决定了准静态颗粒材料的力学表征。同时, TORDESILLAS 等<sup>[38]</sup>、BAGI 等<sup>[39]</sup>、LEŚNIEWSKA 等<sup>[40]</sup>、蒋军等<sup>[41]</sup>研究认为力链屈服是颗粒材料状态转变的主要原因。可以推断,在垮落体中进行顶管施工时,顶管及垮落体颗粒间力链结构的形成与屈服,也必定会对顶进阻力和颗粒结构产生影响。因此,对顶进阻力的演变特征进行研究时,需结合颗粒间力链的屈服行为进行探讨。

综上,为探明垮落体中顶管时,顶进阻力的演变规律,开展了相似模拟试验和数值模拟试验研究。笔者阐述了管道顶进过程中顶进阻力的跌落特征和颗粒的失稳滑落现象,并基于散体力学确定了顶进阻力跌落与力链屈服行为的关联性。为进一步确定力链屈服行为对顶进阻力的影响机制,开展了针对顶管不同部位的顶管数值模拟试验。统计分析了顶进阻力跌落、接触失效、配位数突降、颗粒弹性势能释放和力链长度变化等力链屈服行为的显现特征。本研究揭示了垮落体中顶管时,顶进阻力跌落的内在力学机理,为通过顶管法在垮落体中构建救援通道提供重要参考价值。

## 1 顶管模拟试验

### 1.1 顶管模拟试验

1) 相似模型。垮落体中通过顶管方法构建救援通道如图1所示,为在实验室条件下开展顶管试验研究,基于相似试验原理,采用有机玻璃、电动液压伸缩杆、压力盒及半圆管等材料制作,主体可分为垮落体模型箱、液压顶管及数据记录仪3部分(图2)。其中模型箱尺寸为 250 mm×250 mm×250 mm,可根据相似比模拟不同尺寸的堆积体。同时模型箱顶管一侧为可拆卸钻孔挡板,可根据模拟需求调整钻孔高度及

位置(模型预制钻孔高度和直径均为 50 mm)。

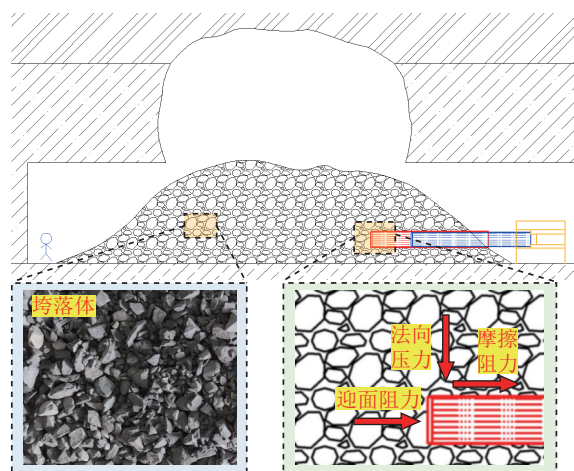


图1 顶管法示意

Fig.1 Schematic diagram of pipe jacking method

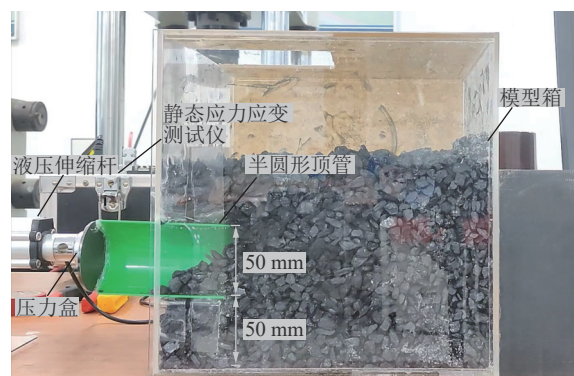


图2 顶管相似模型

Fig.2 Similar model of pipe jacking

根据钻孔直径,本文中预制液压顶管的直径为 50 mm,液压顶管的顶进速度可控制在 0~5 mm/s,最大顶进长度为 100 mm,最大顶进推力为 2 kN。数据记录由静态应力应变测试仪及高速摄影机两部分组成,分别记录顶管过程中顶进阻力数据及颗粒位移图像数据。

试验中模拟的顶管直径和高度原型均为 1 m,可求得长度相似比为  $c_L = L_P / L_M = 1\,000 / 50 = 20$  ( $L_P$  和  $L_M$  分别为原型与相似模型中的几何长度),运动相似比为  $c_v = (c_L)^{1/2} = 4.47$ 。同时,根据模型箱尺寸及长度相似比,选取粒径为 4~8 mm(模拟 80~160 mm 粒径垮落体)的煤颗粒模拟垮落体材料,因此容重相似比为  $c_\gamma = \gamma_P / \gamma_M = 1$  ( $\gamma_P$  和  $\gamma_M$  分别为原型与相似模型中材料的容重),应力相似比为  $c_\sigma = c_L c_\gamma = 20 \times 1 = 20$ 。

2) 数值模型。数值模拟方法的应用能有效补充和进一步分析研究对象的力学特征<sup>[42-43]</sup>,本文参照相似模拟试验进一步开展数值模拟试验研究。顶管数值模型如图3所示,与物理试验相对应,模型的尺寸



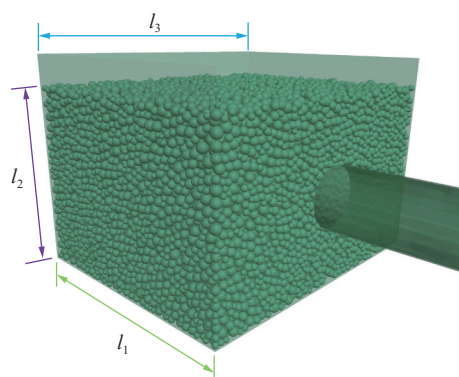
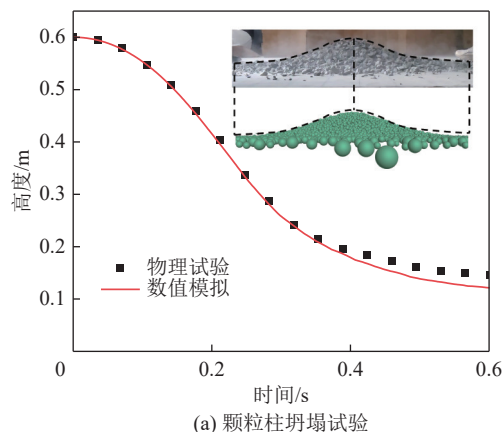


图 3 顶管数值模型

Fig.3 Numerical model of pipe jacking

为  $l_1=4\text{ m}$ 、 $l_2=3\text{ m}$ 、 $l_3=5\text{ m}$ 。其中模型上边界为自由边界,其余边界通过墙体单元 (wall) 进行约束。顶管通过 3DMax 软件绘制,并通过 STL 三维模型文件导入 PFC,最后通过 fish 语言及 wall 单元生成。本试验中将煤颗粒视为刚性颗粒,煤颗粒通过刚性球体单元 (ball) 模拟。

数值模型中颗粒及管道的接触通过平行黏结模



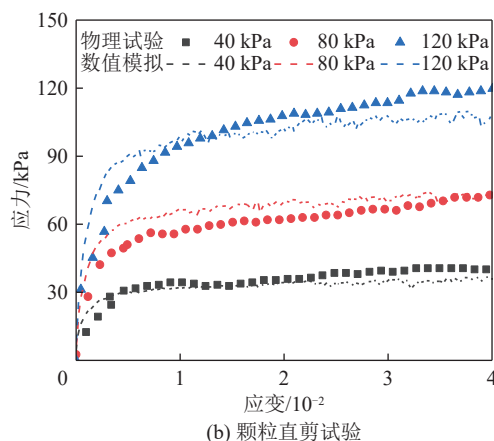
(a) 颗粒柱坍塌试验

型实现,颗粒粒径范围与物理模型相对应,为  $80\sim 160\text{ mm}$ ,且颗粒生成时粒径通过均匀分布随机函数控制。颗粒及管道的具体参数见表 1,其中煤颗粒的参数为根据颗粒柱坍塌试验和剪切试验 (图 4) 确定。模型生成时将颗粒随机生成至模型顶部,并使颗粒在重力作用下自然堆积。待颗粒达到平衡状态后,通过赋予顶管部分墙体单元恒定速率的方式模拟顶管过程。顶管过程中实时监测顶管方向的阻力大小及颗粒的动力学表征。

表 1 模型细观参数

Table 1 Model mesoscopic parameters

| 参数                                   | Wall单元         | Ball单元           |
|--------------------------------------|----------------|------------------|
| 有效弹性模量/Pa                            | $5\times 10^9$ | $2.8\times 10^9$ |
| 刚度比                                  | 2              | 2                |
| 摩擦因数                                 | 0.5            | 0.5              |
| 颗粒粒径/mm                              | —              | $80\sim 160$     |
| 密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | —              | 1 400            |
| 局部阻尼                                 | —              | 0.02             |



(b) 颗粒直剪试验

图 4 颗粒参数标定试验

Fig.4 Calibration test of particle parameters

## 1.2 模拟结果

图 5 中分别为物理相似模拟试验和数值模拟试验中的顶进阻力和煤颗粒位移数据。从图中可知,物理相似模拟试验和数值模拟试验具有较高的一致性。其中,管道受到的顶进阻力随着管道顶进深度的增加而逐步上升,但顶进阻力在管道顶进过程中存在较大幅度的波动现象。同时,煤颗粒在管道顶推作用下形成倾斜位移区,颗粒位移区域主要在顶管正前方及斜上方,且最大位移区域集中在与顶管切口顶端相接触的煤颗粒中。

结合顶进阻力及颗粒位移分布可知,顶管启动初期,顶管正前方的纵向位移区深度随着顶进深度和顶进阻力的增加而增加。在该阶段,顶管前方煤颗粒在

顶管作用下逐渐压实,颗粒间接触力逐渐上升,顶管推力的影响范围逐渐增加。同时,从位移区与相对静止区域的分布可知,煤颗粒在顶管推动作用下形成明显的较为连续的剪切滑移带。其中,剪切滑移带集中在以顶管底端外壁与颗粒的边缘接触点  $A$  为起点、顶管切口前下方煤颗粒内  $B$ 、 $C$  点为拐点、顶管切口前上方煤颗粒边界  $D$  点为终点的曲线周围。

分析顶管、煤颗粒、位移区及滑移带的相对位置可知, $A$  至  $B$  点区域范围煤颗粒位移先后在顶管切口顶进推力及顶管外壁摩擦力的作用下产生,而  $B$  至  $D$  点区域的位移则主要在顶管切口顶进推力作用下形成。值得注意的是,剪切带  $A$  至  $C$  点与顶管的距离明显小于剪切带  $C$  至  $D$  点与顶管的距离,分析认为顶管

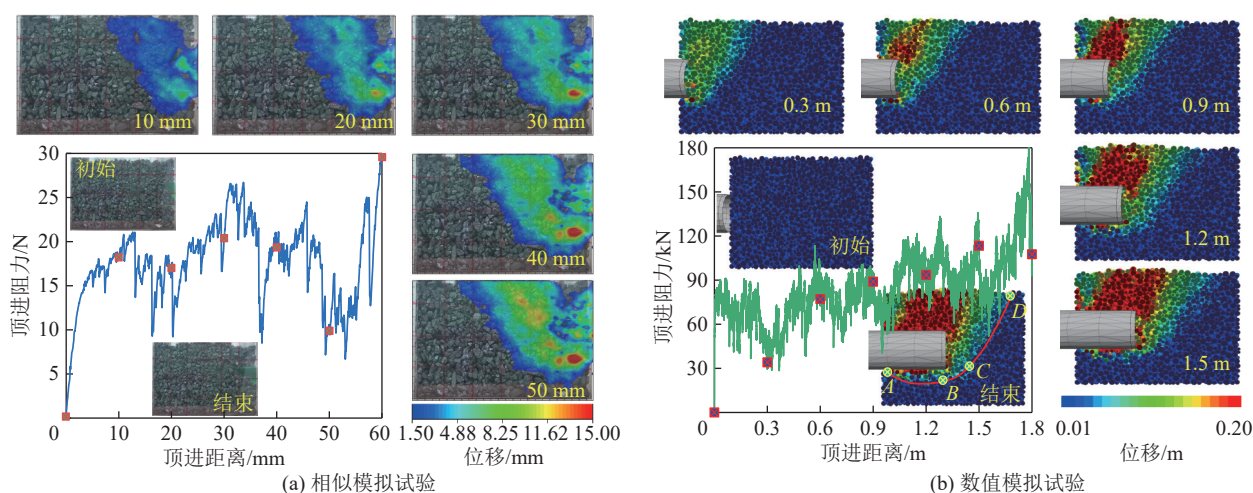


图5 顶管模拟试验结果

Fig.5 Pipe jacking simulation test results

下方煤颗粒存在边界限制,而模型上方为自由边界,煤颗粒更易在顶管前上方产生位移,在顶管下方形成应力集中。

## 2 顶进阻力跌落及力链屈服行为

### 2.1 顶进阻力跌落特征

从图5中的模拟结果可知,顶管在煤颗粒中顶进时,顶管顶进阻力存在较大幅度的波动。同时,从上述分析中已知,煤颗粒的受力状态及位移规律均与顶进阻力相关。因此,有必要对相似模拟试验及数值模

拟试验中顶进阻力的波动特征进行分析。

图6分别为从物理相似模拟试验和数值模拟试验中,截取的顶进阻力曲线跌落部分。从图中可知,在顶进阻力跌落前,管道正前方及斜上方煤颗粒在顶管推动作用下产生向上偏转的位移,管道斜下方煤颗粒则在顶管推动作用下产生向下偏转的位移,且管道下方煤颗粒在顶管作用下逐渐压实。但随着顶进阻力的下跌,管道前上方向上偏转位移的颗粒迅速转变为向下滑移。且随着顶进阻力的持续下跌,管道前上方颗粒产生向下滑移的区域迅速扩大。

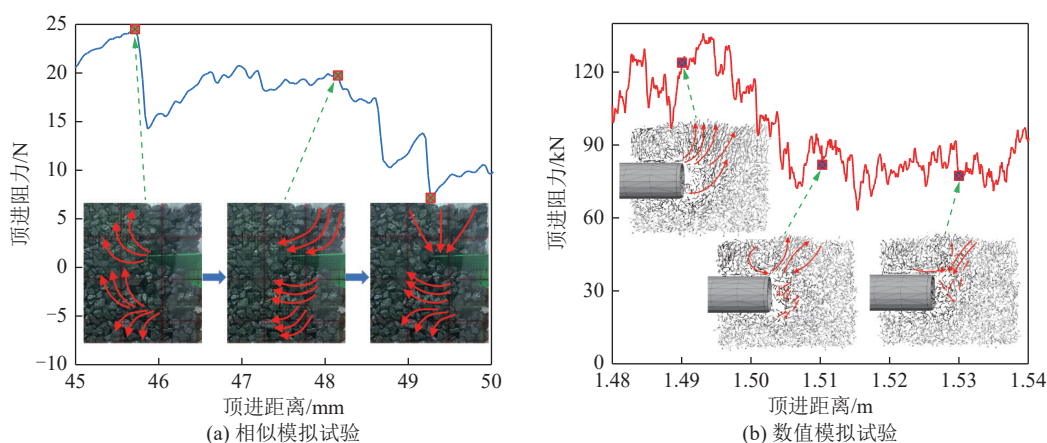


图6 顶进阻力跌落现象

Fig.6 Jacking resistance drop phenomenon

结合材料力学和弹塑性力学可知,常规匀速加载过程中,加载面的应力下降与受载材料的破坏或位移变形相关联,即顶管过程中顶进阻力的下跌现象也与颗粒的材料破坏或颗粒堆积体的结构变形失稳相关联。而从物理试验中可观测到煤颗粒并未发生明显的材料破坏,因此颗粒材料在顶管作用下的破坏主要以结构破坏为主,且煤颗粒在顶管过程中可视为刚体

单元<sup>[44]</sup>。结合颗粒材料的动力学特征可知,颗粒材料中的结构可以通过力链进行描述<sup>[33]</sup>,即顶进阻力的跌落现象与煤颗粒内力链结构的变化相关。

### 2.2 顶进阻力跌落下的力链屈服行为

1) 三维力链识别方法。接触是指以颗粒质心为节点,相互接触颗粒互为链接的简化力学模型;力链是指多个颗粒(3个及以上)沿颗粒主应力相近方向,

依次接触形成的线段(图7)<sup>[45-46]</sup>。学者们研究发现,接触网络中占比较少的强接触(接触力大于平均接触力),积聚和承担了颗粒体系中的绝大部分弹性能和应力<sup>[47]</sup>。在对颗粒体系进行研究时,可将以强接触为基础的强力链作为主要研究对象,强力链通常设定以下基本筛选条件:

$$\begin{cases} \theta_i \leq \theta_c \\ f \geq \bar{f} \\ n \geq 3 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\theta_i$  为接触间的夹角;  $\theta_c$  为角度阈值;  $f$  为接触力值;  $\bar{f}$  为接触力平均值;  $n$  为力链中颗粒数目。

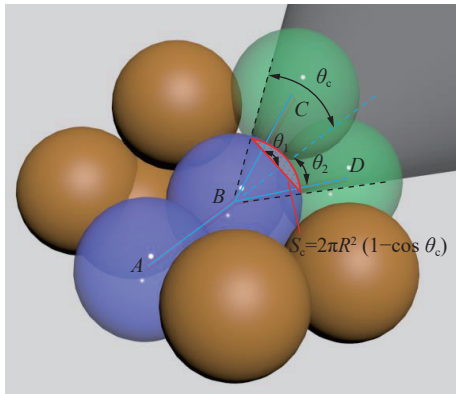


图7 力链识别方法

Fig.7 Force chain identification method

$\theta_c$  是区分不同力链的主要判断标准,不同的  $\theta_c$  取值获得的力链结果具有较大差异。在孙其诚等<sup>[36]</sup>的研究中,认为  $\theta_c$  的取值应与颗粒材料的整体结构相关联,故引入配位数  $Z$  计算二维状态下的  $\theta_c$ :

$$\theta_c = \frac{180}{Z} \quad (2)$$

对式(2)表达的几何规律进行分析可知,当将二维空间方向按配位数进行划分时,接触  $C_1$ (颗粒A与颗粒B的接触)与力链中下一个接触  $C_i$ (颗粒B与除颗粒A以外颗粒的接触)的向量夹角应当控制在单倍空间方向角度  $[-\theta_c, \theta_c]$  内。结合圆盘颗粒半径,则接触  $C_i$  应位于与接触  $C_1$  相对的,范围为  $[-\theta_c R, \theta_c R]$  的圆弧上。而在三维状态下,可进一步将角度值  $\theta_c$  与几何长度(二维弧长  $\theta_c R$ )的关系转换为与几何面积(三维球冠面积  $S_c$ )的关系:

$$S_c = 2\pi R^2 (1 - \cos \theta_c) \quad (3)$$

将球体面积按配位数进行划分,并结合球冠面积可得:

$$\frac{4\pi R^2}{Z} = 2\pi R^2 (1 - \cos \theta_c) \quad (4)$$

化简可得:

$$\theta_c = \arccos\left(\frac{Z-2}{Z}\right) \quad (5)$$

2) 阻力跌落时的力链屈服行为。与图6b相对应,图8为数值模拟中顶进阻力跌落前后的力链结构。从图中可知,在顶进阻力跌落的同时,顶管前方颗粒与顶管间强力链结构的接触强度发生明显下降,且部分力链发生失效,说明顶进阻力的跌落现象与煤颗粒材料内力链的失效过程直接相关。

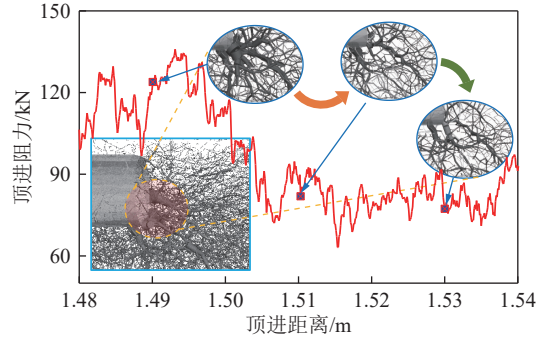


图8 力链屈服现象

Fig.8 Phenomenon of force chain buckling

在对力链结构的研究中, TORDESILLAS<sup>[38]</sup>和蒋军<sup>[41]</sup>等认为力链的屈服是颗粒材料应力和能量集体释放的主要原因,而力链的压曲变形和屈服过程是颗粒材料整体变形的主要原因(图9),即顶进阻力的跌落和颗粒材料的位移变形均与力链结构的屈服过程相关。因此为研究在颗粒堆积体中进行顶管时,力链屈服对顶管的影响,需在考虑顶管受力基础上,进一步开展不同条件下的顶管试验。

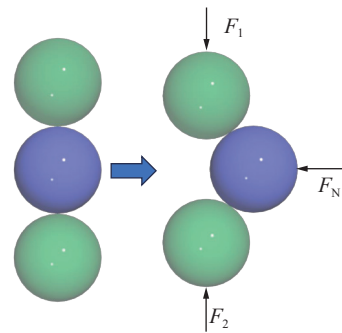


图9 力链屈服示意

Fig.9 Schematic diagram of force chain buckling

### 2.3 考虑力链屈服的顶管模拟试验

对顶管的受力进行分析可知,顶进过程中顶管在顶进方向的受力中,顶管切口部分主要由颗粒-顶管法向支撑力组成,而顶管内外壁部分则主要由颗粒-管道间摩擦力组成。如图10所示,为顶管不同部位的顶进阻力-顶进距离关系曲线。从图中可知,随着顶进深度的增加,切口顶进阻力的波动幅度较大,且



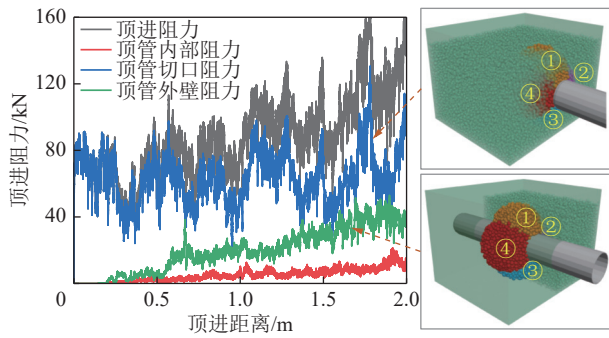


图 10 顶管不同部位阻力

Fig.10 Resistance of different parts of pipe jacking

该部分阻力均值及波动范围逐渐趋于稳定;而内外壁顶进阻力的波动幅度较低,且随着顶进深度的增加而稳定增加。说明切口及内外壁顶进阻力均受力链屈服的影响,但由于内外壁阻力以摩擦力作用为主,因此其对颗粒的作用相对切口较弱,且其与顶进深度呈正比关系。

为针对性分析管道不同部位对颗粒的顶推作用,进而研究管道顶进过程中顶进阻力和力链结构的力学行为,本文将顶管过程拆分为分别针对顶管切口及顶管外壁的两部分顶管试验(图 10)。其中,为研究不同位置的颗粒及力链演变规律,在顶管切口及四周各设置 4 个测量圆进行监测。同时,考虑到颗粒堆积厚度、顶管半径、粒径及有效模量,分别对顶进阻力大小及力链屈服过程<sup>[48]</sup>有较大影响。本文选取上述因素,进行 4 因素 3 水平正交试验(表 2),选取正交表为  $L_9(3^4)$ ,试验设计见表 3。

表 2 正交试验因素和水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment

| 水平 | 顶管上方<br>颗粒厚度/m | 顶管半径/m | 粒径/cm | 有效模量/ $10^9$ Pa |
|----|----------------|--------|-------|-----------------|
| 1  | 0.5            | 0.4    | 6~12  | 2.1             |
| 2  | 1.5            | 0.5    | 8~16  | 2.8             |
| 3  | 2.5            | 0.6    | 10~20 | 3.5             |

### 3 考虑力链屈服的顶管-颗粒动力学行为分析

#### 3.1 顶进阻力

图 11 和图 12 为不同因素及不同研究部位顶管试验中,顶进阻力、配位数及能量的演变图。将顶进阻力与图 4b 对比可知,顶进阻力曲线的变化特征与颗粒的剪切应力-应变曲线特征具有较高的相似度。以外壁试验中各因素水平分别为 2-2-2-1 时的阻力曲线为例(图 13),顶进阻力在顶管启动后,先后呈现阻力快速上升(OA 段)、减速增长(AB 段)、跌落(BC 段)及再次上升(CD 段)。OA 阶段对应受顶推部

表 3 正交试验表

Table 3 Orthogonal test table

| 编号 | 顶管上方<br>颗粒厚度/m | 顶管半径/m | 粒径/cm | 有效模量/Pa           |
|----|----------------|--------|-------|-------------------|
| 1  | 0.5            | 0.4    | 6~12  | $2.1 \times 10^9$ |
| 2  | 0.5            | 0.5    | 10~20 | $2.8 \times 10^9$ |
| 3  | 0.5            | 0.6    | 8~16  | $3.5 \times 10^9$ |
| 4  | 1.5            | 0.4    | 10~20 | $3.5 \times 10^9$ |
| 5  | 1.5            | 0.5    | 8~16  | $2.1 \times 10^9$ |
| 6  | 1.5            | 0.6    | 6~12  | $2.8 \times 10^9$ |
| 7  | 2.5            | 0.4    | 8~16  | $2.8 \times 10^9$ |
| 8  | 2.5            | 0.5    | 6~12  | $3.5 \times 10^9$ |
| 9  | 2.5            | 0.6    | 10~20 | $2.1 \times 10^9$ |

分颗粒的压实过程,AB 阶段对应力链结构的压曲变形过程,BC 阶段对应力链结构的屈服,CD 阶段对应力链结构破坏重构后的再次压实。但顶进阻力跌落和再次上升现象与锯齿模型<sup>[49]</sup>描述的常规剪切行为具有较大差异,顶进阻力在每次下跌后的上升过程与 OA 段和 AB 段具有较高的相似性。结合力链结构屈服后颗粒的运动特征(图 6)可知,屈服力链内及其周围部分颗粒会在重力作用下发生滑移和二次堆积,并形成与初始堆积相似的堆积结构,屈服部分颗粒会再次在顶管作用下经历压实和压曲变形过程。

图 14 为分别对顶进阻力跌落情况进行的统计,结合图 11、图 12 中顶进阻力的跌落特征可知:① 顶管切口试验中顶进阻力的跌落频率及跌落幅度均明显大于顶管外壁试验,但顶管切口试验中阻力跌落的周期性较差;② 两类试验中,阻力跌落值小于 5% 平均阻力的小幅度跌落情况的占比均较高;③ 当管径和有效模量增加、颗粒厚度和粒径降低,顶进阻力跌落频率均呈增加趋势;④ 当粒径降低和颗粒厚度增加时,顶进阻力跌落幅度呈降低趋势。

分析两类试验中顶管对颗粒的作用方式可知,顶管切口对颗粒的作用主要为沿顶进方向的支撑力,颗粒受管道作用力的方向与管道的顶进方向保持一致;而顶管外壁对颗粒的作用则主要通过颗粒-管道间摩擦力实现,管道对颗粒作用力的方向与管道顶进方向呈一定夹角(夹角取值约为  $\arctan \mu$ ,  $\mu$  为颗粒-管道间摩擦系数),且作用力大小受颗粒-管道间摩擦系数限制。即顶管切口对颗粒的加载方式为以支撑力为主的压剪复合加载,而顶管外壁对颗粒的加载方式为以摩擦力为主的剪切加载。因此,条件相同时,顶管切口作用下的阻力上升-跌落周期长度(颗粒压实、力链压曲变形及力链屈服过程所需时间或顶进距离)更短、

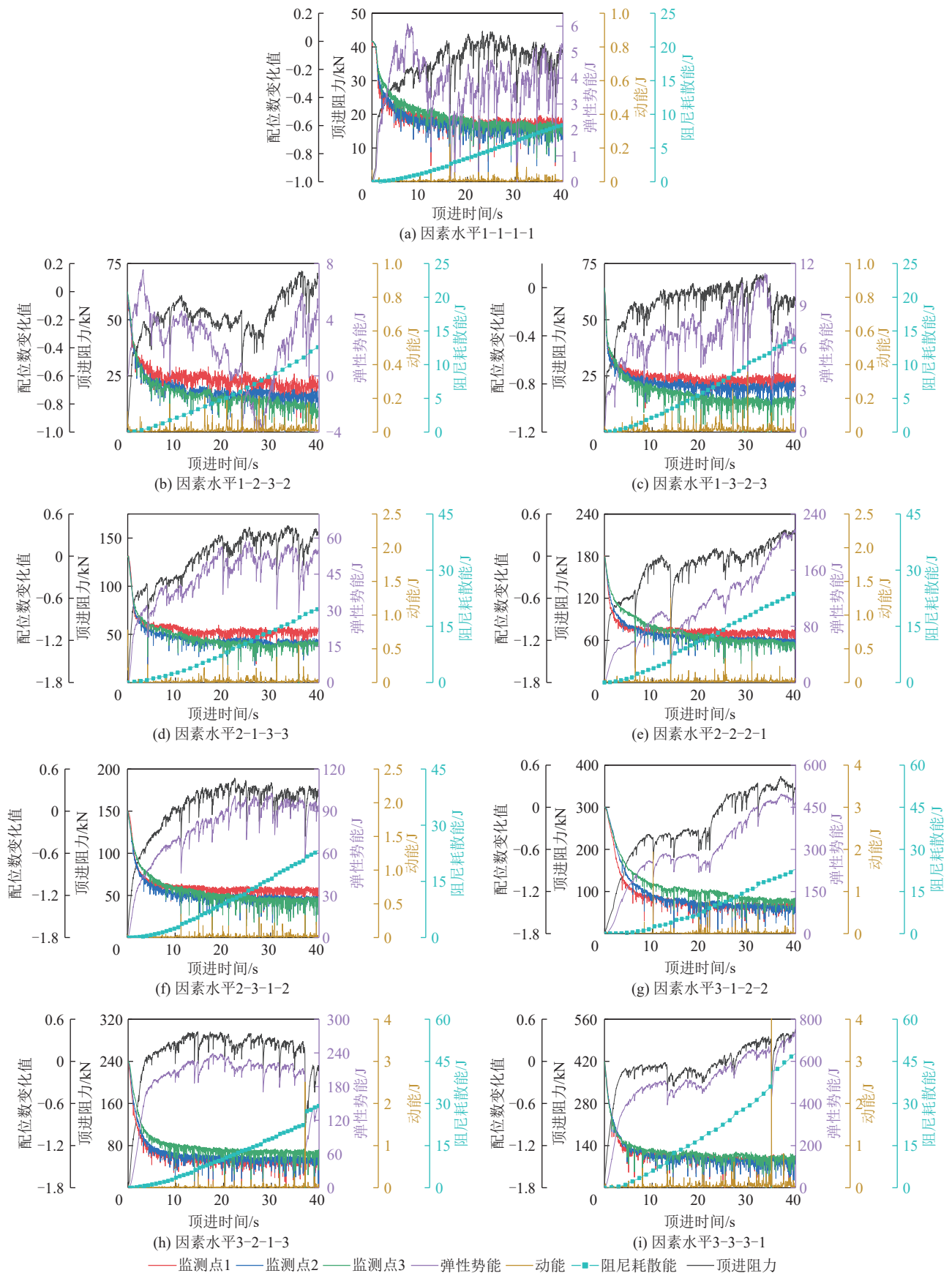


图 11 顶管切口试验监测结果

Fig.11 Pipe jacking incision test monitoring results



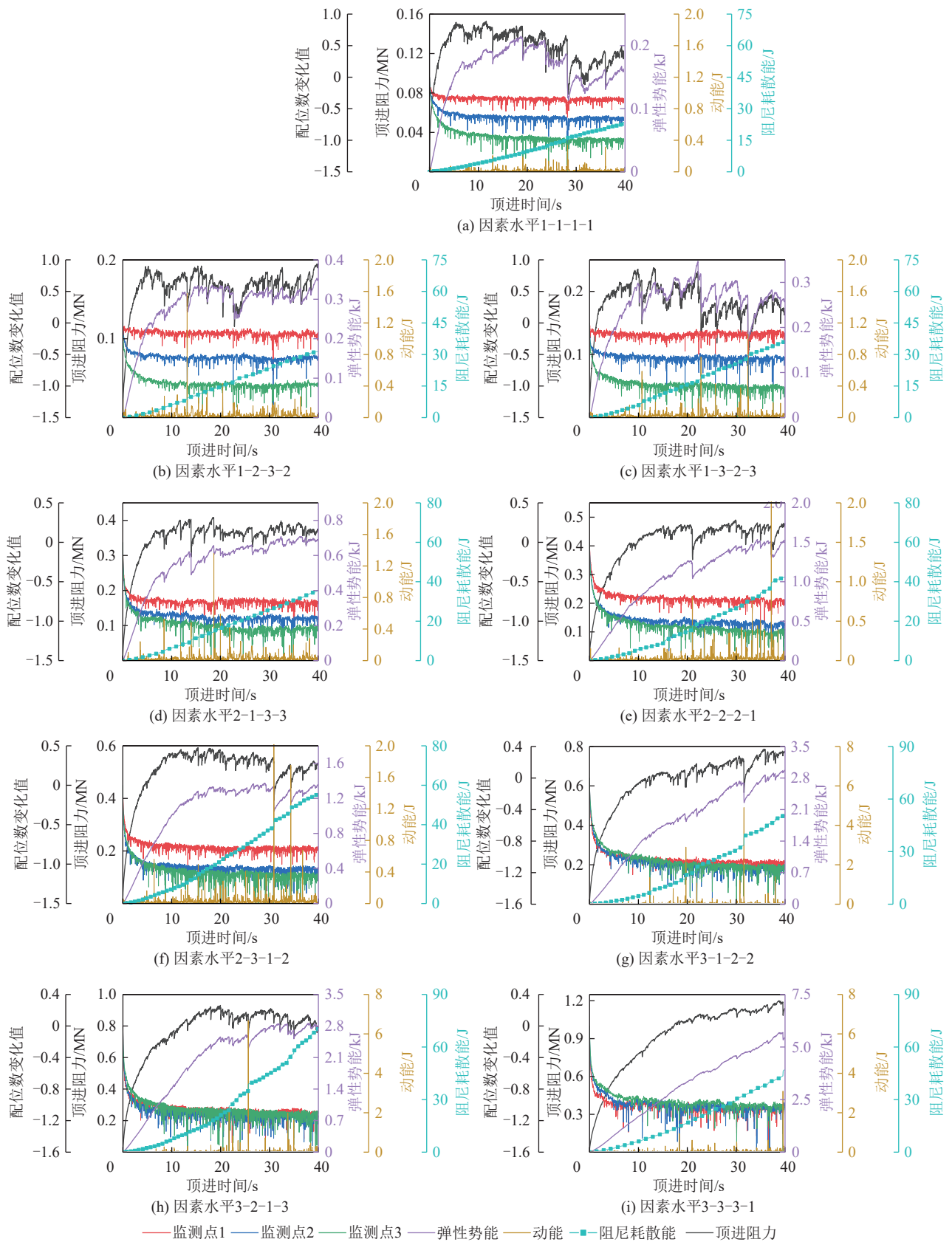


图12 顶管外壁试验监测结果

Fig.12 Pipe jacking outer wall test monitoring results

频率更高,具体表现为顶管切口试验中的  $OA$  段和  $AB$  段持续时间均明显低于顶管外壁试验中。

对不同试验的顶进阻力值进行分析可知,顶管上方颗粒堆积厚度及顶管管径对顶进阻力大小起主导

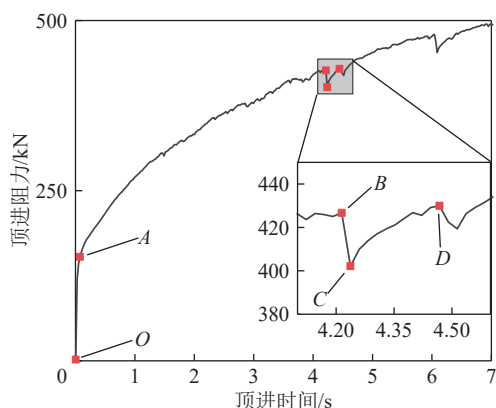


图 13 启动时顶进阻力演变

Fig.13 Evolution of jacking resistance at start-up

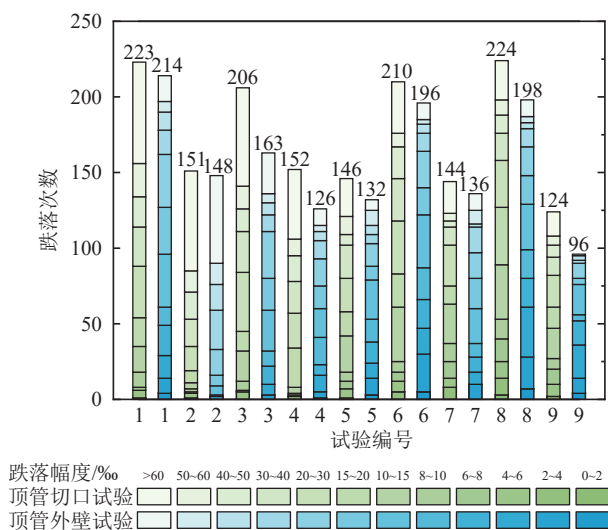


图 14 顶进阻力跌落次数

Fig.14 Number of pipe jacking resistance drops

作用。其中,由于上覆载荷增加时颗粒间的咬合程度和压实程度均得到了增加,上覆载荷的增加在导致管道-颗粒间摩擦力增加的同时,也增强了力链结构的抗变形能力,即颗粒支撑管道的力链需在更大应力作用下才能发生变形和屈服(如图 11、图 12 中各阻力曲线的 AB 段)。但如图中各阻力曲线的 OA 段所示,上覆载荷的增加并未明显影响该部分的斜率,可见上覆载荷的增加对顶管压实颗粒阶段的影响较小。

### 3.2 配位数

配位数  $Z$  是指颗粒间接触数与颗粒数的比值(计算如式 (6) 所示),能有效的反映颗粒间的接触情况,并能对颗粒材料的体积分、孔隙率的变化做出响应<sup>[30]</sup>。通过前文的分析已知,在顶进阻力发生跌落时,屈服力链内及其周围颗粒均会发生失稳,并在重力作用下重新堆积,而颗粒这些力学行为必然会导致配位数的突变。本文通过监测测量球范围内颗粒的接触情况,对顶管顶进过程中颗粒的配位数进行分析。

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} N_c^i}{N_p} \quad (6)$$

式中:  $N_p$  为颗粒总数,  $N_c^i$  为第  $i$  个颗粒的接触数量。

为对比不同监测点配位数的变化特征,对各监测点配位数监测数据作减去初始值处理,处理后的配位数变化值随顶进曲线的变化曲线如图 11、图 12 所示(监测点 2 和 4 配位数基本一致,因此只对监测点 2 进行分析)。从图中可知,随着顶管启动,配位数迅速降低,但配位数降低速率随着顶进距离增加而下降,且配位数跌落后的回归值逐渐趋于固定。同时,结合顶进阻力曲线可知,顶进阻力跌落时均会发生配位数跌落等响应现象。

对比不同试验中的配位数变化值的曲线可知,顶管上方颗粒堆积厚度及顶管方式对配位数变化值有明显的影响。其中,顶管切口试验和顶管外壁试验中,监测点 2 配位数变化值均随颗粒堆积厚度的增加而增加。而监测点 1 和 3 配位数变化值虽也随着颗粒堆积厚度的增加而增加,但颗粒堆积厚度对监测点 1 和 3 的影响程度分别高于和低于监测点 2 和 4,且这种情况在顶管外壁试验中被加剧。

以各因素水平分别为 2-2-2-1 时的两类试验为例,对顶进阻力跌落期间配位数的跌落次数进行统计,如图 15 中所示,阻力跌落期间各监测点配位数并不全部发生跌落,且部分监测点配位数在阻力跌落期间发生多次跌落。同时,从图中可知,随着顶进阻力跌落值的增加,阻力跌落期间内发生配位数跌落的监测点及配位数跌落的总次数均增加。由此可推断,随着顶进阻力跌落值的增加,力链跌落的影响范围及持续时间增加。结合力链结构屈服现象进行分析可知,顶进阻力跌落值与屈服力链中应力集中程度相对应。随着顶进阻力跌落幅度的增加,力链结构屈服破坏导致的颗粒失稳和滑移范围增加。

颗粒堆积厚度增加导致的配位数变化值增加主要有 2 方面原因: ① 如图 16 所示,随着上覆载荷的增加,颗粒的压密程度和接触数增加,即颗粒的初始配位数增加,而力链在同一条件下屈服时,屈服点周围颗粒的配位数相近,顶管前后配位数变化幅度增加; ② 随着顶管上覆载荷的增加,颗粒的咬合程度和连续性增加,即力链的稳定性和抗破坏性增加,同等条件下力链压曲变形必然会带动力链周围更多颗粒位移,即更大范围内颗粒的接触数量下降。

而结合不同监测点颗粒的空间位置及受力状况可知,顶管底部及两侧(对应监测点 2、3、4)存在刚性

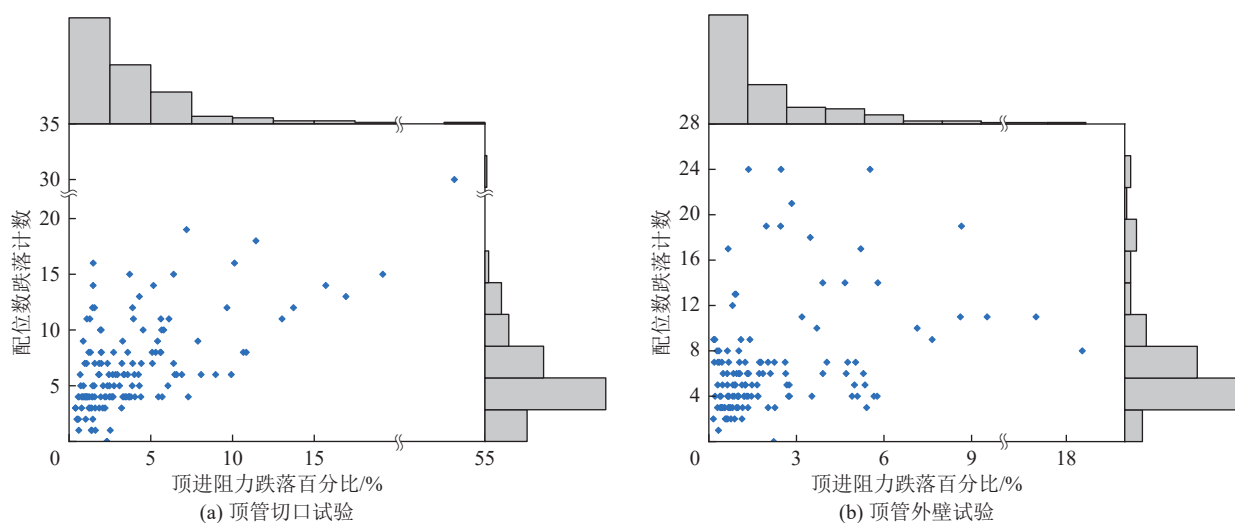


图15 配位数跌落统计

Fig.15 Coordination digit drop statistics

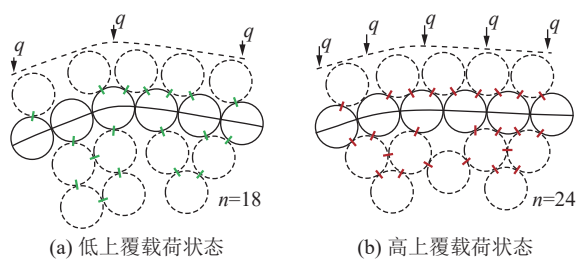


图16 颗粒接触状态

Fig.16 Contact state of particles

边界, 颗粒受顶管推动、挤压的位移空间受限。因此在管道上方颗粒堆积厚度较低时, 监测点 1、2、4 处的颗粒易向颗粒堆积体上自由边界面位移, 作为强力链支撑的非顶进方向弱力链及颗粒更易发生屈服和滑移, 即力链结构的最大变形量和配位数的最大变化值下降, 具体表现为图 11a—图 11c 及图 12a—图 12c 中, 监测点 1、监测点 2、监测点 3 的配位数变化幅度依次增加。但随着上覆颗粒的增加, 监测点 3 处较小的边界距离反而限制了力链的压曲变形, 具体对应为图 11g—图 11i 及图 12h、图 12i 中监测点 4 配位数变化值略低于其它监测点。上述现象和原因可以总结为颗粒的边界效应<sup>[50]</sup>, 而图 11a、中顶管切口试验和顶管外壁试验中的配位数差异主要是因为顶管对颗粒的作用范围不同, 低上覆颗粒厚度时的顶管外壁试验加剧了边界效应。

### 3.3 堆积体能量

对颗粒材料的研究中, 颗粒堆积体整体的能量演变, 即是对细观力链结构变化的响应, 又是对颗粒堆积体宏观动力学表征的概括。弹性势能增值、动能及耗散能随管道顶进的变化曲线如图 11、图 12 中所示。其中, 由于顶管切口及外壁两类试验中, 顶管对颗粒

作用方式的不同, 弹性势能的演变特征具有较大的差异性。对比两类试验中的弹性势能曲线可知, 顶管切口试验中弹性势能随管道顶进的上升时间明显较短, 但弹性势能达到初次峰值后的跌落特征, 两类试验均与顶进阻力的跌落和上升相呼应。而相对于弹性势能, 动能及耗散能在顶进过程中的演变基本一致, 两者的平均值均明显随颗粒堆积厚度的增加而增加, 且两者随顶管顶进的变化特征能与顶进阻力的变化特征相呼应。

在弹性势能方面, 弹性势能增值是描述颗粒材料在外部加载作用下, 颗粒材料应力集中程度及颗粒变形量的重要参考变量。参考颗粒材料双轴压缩过程的 4 个阶段<sup>[31]</sup>, 结合图 17 中的弹性势能增值曲线 (各因素水平为 1-1-1-1) 的演变特征可知, 在上覆堆积厚度较低的顶管切口试验中, 弹性势能的初始演变过程也可划分为 4 个阶段: 线性增长阶段 (I)、非线性增长阶段 (II)、软化阶段 (III) 和平衡趋稳阶段 (IV)。其中线性增长阶段和非线性增长的时间节点, 分别与

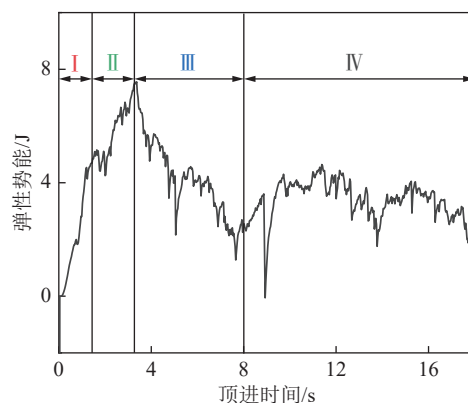


图17 弹性势能演变规律

Fig.17 Evolution law of elastic potential energy



阻力曲线中的快速增长阶段 ( $OA$  段) 和减速增长阶段 ( $AB$  段) 的时间节点基本一致。但在曲线第一次达到峰值后, 弹性势能增值曲线中出现较大幅度的下跌, 与顶进阻力曲线的整体演变规律有较大差异。

对比图 18 中的颗粒速度分布可知, 在顶管推力及弹性势能达到峰值后, 颗粒间逐渐形成剪切滑移面 (如图中红色分界线所示)。同时, 分界线靠近顶管一侧颗粒为高位移区, 且高位移区内颗粒位移方向在顶推作用下逐渐统一。这与颗粒在顶推作用下发生解卡行为<sup>[38]</sup>相符, 颗粒在顶管初期逐渐被压实, 但并未发生大范围的力链结构破坏和颗粒滑移, 因此弹性势能呈快速增长变化。在顶管推力达到临界值后, 力链沿滑移面发生较大范围的破坏, 且颗粒向自由面整体滑移, 颗粒间的弹性势能得以释放。其中此阶段顶进阻力未发生整体下降的原因主要分为 2 部分: ① 顶管上方颗粒堆积厚度较低时, 顶管下方颗粒的对顶管的支撑阻力占主导地位; ② 在重力引导下, 颗粒发生整体滑移前后, 滑移区颗粒对顶管的作用方式及作用力大小不变, 重力载荷均沿力链向顶管传递。因此, 随着上覆堆积颗粒厚度的增加, 虽然顶管前方颗粒仍然会形成滑移面, 但在上覆载荷的作用下, 滑移区内的颗粒的压实程度明显上升, 此时的弹性势能增值曲线 (图 11e) 并没有较明显的整体降低。

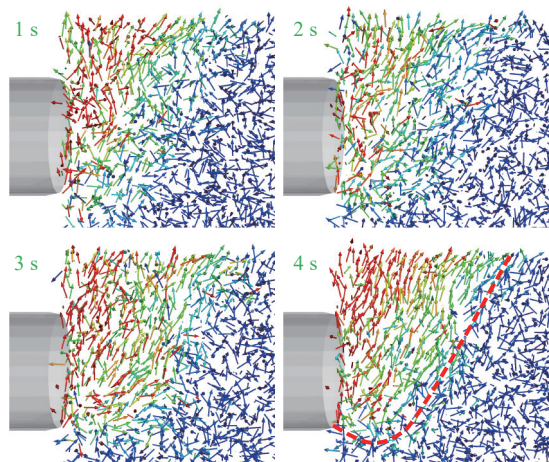


图 18 顶管作用下的颗粒解卡滑移

Fig.18 Unstuck slippage of particles under pipe jacking

相对于切口试验, 顶管外壁试验中, 除顶管初期的线性增长和非线性增长基本保持一致, 弹性势能增值在初次峰值后并未发生整体下降, 而是在保持与顶进阻力跌落规律一致的情况下逐渐上升。一方面, 顶管外壁试验中, 颗粒对顶管的摩擦阻力主要由颗粒-顶管间的法向支撑力决定, 因此管道-颗粒间力链内应力集中状态对阻力变化起主导作用; 另一方面, 顶管外壁试验中, 顶管上方颗粒均在顶管顶推作用影响

范围内, 顶推过程中不同区域颗粒均同步向顶推方向变形挤压, 滑移面主要集中在颗粒-管道的交界处, 而颗粒堆积体内不存在沿滑移面整体滑移和释放弹性势能的情况, 即弹性势能虽随部分力链屈服而发生跌落, 但整体仍呈增长趋势。

在动能及耗散能方面, 动能对于颗粒滑移及力链屈服后的弹性势能释放有较好的响应。如图 11、图 12 中所示, 当顶进阻力及弹性势能处于 2 个增长阶段时, 除启动阶段及少数颗粒失稳的情况, 动能的数值均较小, 而随着阻力的跌落和弹性势能的释放, 动能数值明显上升。同时, 动能的整体数值大小与力链中的弹性势能集中程度呈正相关关系。而阻尼耗散能作为在颗粒碰撞前后能量缺损的统计, 其基本与弹性势能的释放和动能的变化相关联。同时, 如图 12e 所示, 在弹性势能及顶进阻力仅发生较小幅度跌落时, 也有可能由于力链屈服对整体力链结构影响较大, 而发生较大范围的颗粒滑移 (动能增长), 从而导致平衡过程中耗散能的急剧增长。而对图 11、图 12 中各类曲线的突变点进行分析可知: 顶进阻力跌落后, 弹性势能、动能及耗散能依次响应, 且各部分能量的响应均相对前一部分能量存在延迟。这一特征基本与力链屈服后, 力链内其他颗粒弹性势能的释放过程及动能、耗散能的转化顺序相对应。

### 3.4 失效接触

通过 3.2 节中描述的强力链识别方法, 对顶进阻力跌落前后一秒内的强力链进行识别, 并通过对比强力链中各个接触的 ID, 统计阻力跌落期间的屈服失效接触。如图 19 所示, 为顶进阻力跌落幅度相近时, 失效接触在模型中的分布, 其中标记球半径代表阻力跌落前的接触力大小。

对失效接触的位置进行分析可知, 在顶管切口试验中, 顶进阻力跌落时失效接触的分布范围与图 5 中顶管初期的位移范围相似, 且纵向分布范围明显随颗粒堆积厚度增加而增加。结合图 6 中颗粒在顶管推动作用下的位移规律可知: ① 颗粒在顶管推动作用下被压实, 其中顶管下方颗粒受边界约束作用, 其颗粒压实程度及力链中应力集中程度均明显高于顶管上方, 与失效接触中接触力较大的部分主要集中在顶管切口前下方相对应; ② 颗粒堆积体在顶管推动作用下, 易产生向颗粒堆积体自由边界 (上表面) 的位移, 即切口斜上方颗粒更易发生错动和滑移, 因此顶管前上方颗粒易产生较为频繁的力链屈服; ③ 随着上覆颗粒堆积厚度增加, 纵向力链的侧向支撑力上升, 力链屈服所需应力更高, 力链中应力传递范围增加, 力链屈服时导致的接触失效的纵向分布范围也同步增加;

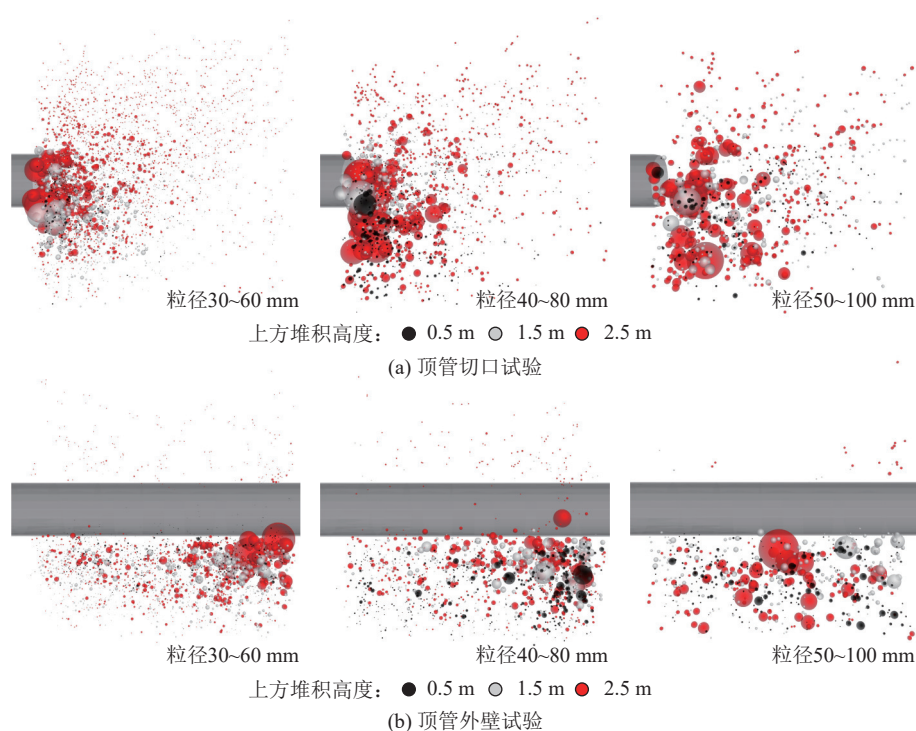


图19 失效接触分布

Fig.19 Failure contact distribution diagram

④ 随着颗粒粒径增加,失效接触的密度明显下降,相同长度力链的有效长度增加,且接触力较大的失效接触逐渐向顶管周围扩散。

与顶管切口试验中不同的是,在顶管外壁试验中,失效接触主要集中在顶管的下方,顶管上方的失效接触基本以小接触力力链为主,且顶管上方失效接触随颗粒堆积厚度的增加而增加。对不同堆积厚度下颗粒与管道的受力进行分析可知,随上覆颗粒堆积厚度的增加,颗粒与顶管间的最大摩擦力(本文中取滑动摩擦力)随支撑力同步增加,即顶管对同一位置颗粒的顶推力增加。因此,虽然上覆颗粒中纵向力链的侧向支撑力得到加强,但力链屈服的影响范围仍然在上升。值得注意的是,由于模型右侧顶进方向存在墙体

作为位置限制,靠近墙体一侧的颗粒缺少可错动的空间,靠近墙体一侧颗粒更易在顶管推进过程中形成高应力集中,在高应力作用下的力链也更易发生屈服。

### 3.5 力链形态

散体材料中,力链长度及力链准直系数能较好的反映应力在散体材料的传递距离及影响范围。通过强力链识别方法,利用 Fish 语言,对不同试验中的强力链进行筛选编号,并统计力链长度及力链准直系数。如图 20 和图 21 所示,为顶管顶进相同距离后,力链长度及准直系数的统计结果。

对力链长度进行分析可知,各试验中力链长度分布概率随力链长度的增加呈指数下降,且在不同试验中短力链均为力链网络的主要组成部分。对比不同

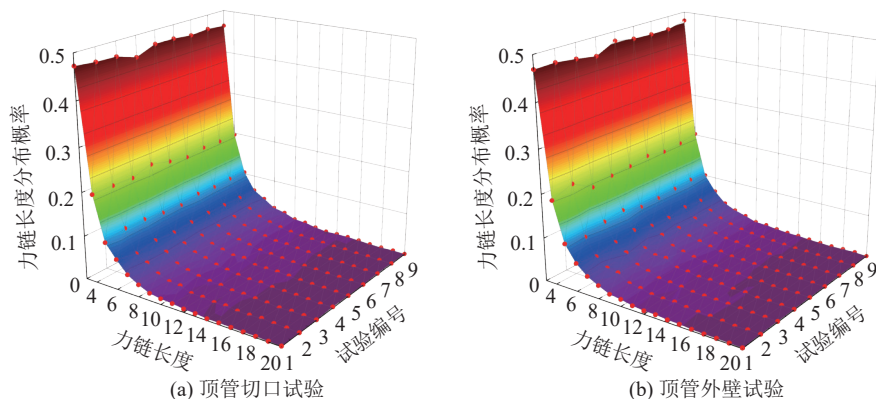


图20 力链长度分布

Fig.20 Force chain length distribution



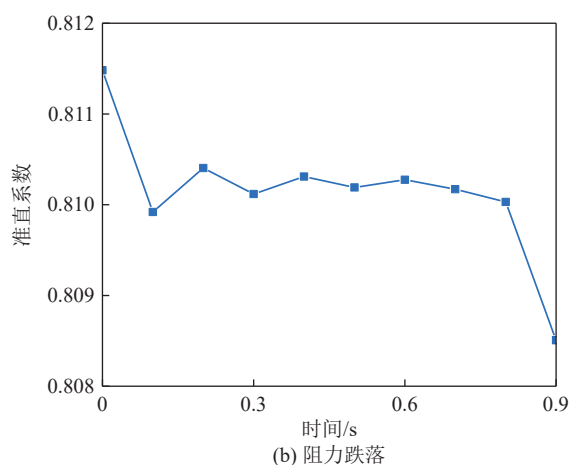
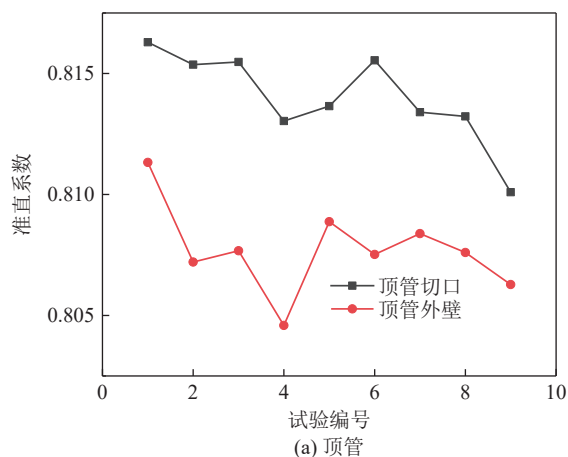


图 21 准直系数统计

Fig.21 Collimation coefficient statistics

试验中力链长度分布概率可知,随着颗粒粒径和有效模量增加,颗粒的短力链占比及准直系数明显下降。说明此时力链网络中,强力链的侧向支撑数量降低,力链的压曲变形程度上升。一方面,相同长度力链屈服所需压曲变形量随着粒径的增加而增加,相同顶进距离下,大颗粒力链易在压曲变形后形成应力拱。另一方面,相同压缩长度下,力链中应力集中程度随着有效模量增加而增加,力链更易发生压曲变形,这与顶进阻力跌落次数随有效模量的变化相对应(图14)。

为进一步探讨顶进阻力跌落过程中,力链长度及准直系数的变化规律,以各因素水平为3-3-3-1的切口试验为例进行分析。图22中为顶管顶进35s后,顶进阻力发生跌落时,各力链长度计数的变化值。从图中可知,顶进阻力跌落瞬间(0.1s),顶管前颗粒解卡滑移,长力链发生屈服并分解成较大数量的短力链。随着颗粒在重力作用下再次堆积平衡(0.3s),此时短力链数量发生较大幅度下跌。随着顶管对颗粒的再次压实(0.5~0.9s),短力链再次重组形成长力链。在这一过程中,力链的准直系数先后发生2次跌落(图21),分别对应力链的整体屈服和颗粒再次压实过

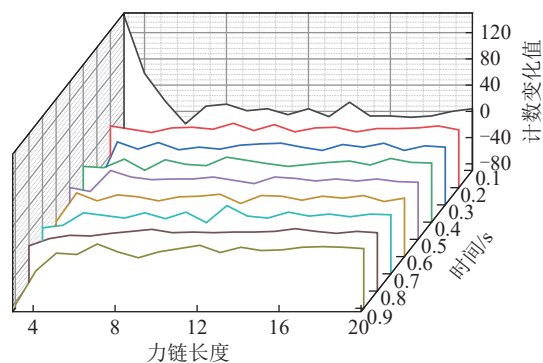


图 22 顶进阻力跌落后的力链长度变化

Fig.22 Change in force chain length after jacking resistance falls

程中力链的压曲变形。

## 4 结 论

1) 对比物理模拟与数值模拟结果可知,顶管过程颗粒的宏观位移主要集中在顶管切口斜上方,且颗粒内存在较明显、连续的剪切滑移带,而顶管阻力的跌落现象能与局部范围内的颗粒失稳滑移和力链屈服失效相互映照。

2) 顶进阻力的跌落频率与管径和有效模量呈正相关关系、颗粒厚度和粒径呈负相关关系,且顶管切口试验明显大于顶管外壁试验,顶进阻力的循环上升-跌落特征具有较高的相似性,其中重力引导下的颗粒滑移重排是循环相似的主要原因。

3) 力链长度及力链有效长度随着上覆颗粒厚度及粒径的增加而增加,导致力链影响范围增加,并进一步导致了屈服接触分布范围、配位数变化幅度、力链压曲变形程度及弹性势能增加幅度的增加。

4) 颗粒在顶推作用下的解卡滑移是颗粒内弹性势能释放、长力链分解的主要原因,但受重力引导下的颗粒滑移重排影响,顶管上方颗粒的剪切滑移对顶管阻力的整体影响较小。

## 参考文献(References):

- [1] 郝传波,张睿,成乾龙,等.破碎煤体再造矩形通道受力分析[J].中国安全生产科学技术,2018,14(12):114-118.  
HAO Chuanbo, ZHANG Rui, CHENG Qianlong, et al. Stress analysis of reconstructive rectangular passage in fragmentized coal body[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(12): 114-118.
- [2] 田宏亮,张阳,郝世俊,等.矿山灾害应急救援通道快速安全构建技术与装备[J].煤炭科学技术,2019,47(5):29-33.  
TIAN Hongliang, ZHANG Yang, HAO Shijun, et al. Technology and equipment for rapid safety construction of emergency rescue channel after mine disaster[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 29-33.
- [3] 许献磊,马正,陈令洲.煤矿地质灾害隐患透明化探测技术进展与



- 思考[J]. 绿色矿山, 2023, 1(1): 56–69.
- XU Xianlei, MA Zheng, CHEN Lingzhou. Progress and thinking of transparent detection technology for hidden geological hazards in coal mines[J]. *Journal of Green Mine*, 2023, 1(1): 56–69.
- [4] 高振宇. 深部煤矿高抽巷顶管施工力学行为及对策研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- GAO Zhenyu. study on mechanical behaviors and control measures of the pipe-jacking method applied for excavate high level suction roadway in deep coal mine[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [5] 张耀, 闫治国, 朱合华. 大口径新型顶管力学行为现场试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(10): 1842–1850.
- ZHANG Yao, YAN Zhiguo, ZHU Hehua. Site-based researches on mechanical behavior of new large-diameter pipes during pipe jacking[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(10): 1842–1850.
- [6] 焦程龙, 赵歆, 牛富俊. 矩形顶管管-土接触面状态及顶推力预估[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(10): 1459–1464.
- JIAO Chenglong, ZHAO Xin, NIU Fujun. Pipe-soil contact state and jacking force prediction of rectangular pipe jacking[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(10): 1459–1464.
- [7] 张志伟, 李忠超, 梁荣柱, 等. 软土地层矩形顶管掘进引起地表隆沉变形分析[J]. *岩土力学*, 2022, 43(S1): 419–430.
- ZHANG Zhiwei, LI Zhongchao, LIANG Rongzhu, et al. Analysis of upheaval and settlement deformation of ground surface caused by excavation of rectangular pipe jacking in soft soil stratum[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(S1): 419–430.
- [8] CHAPMAN D N, ICHIOKA Y. Prediction of jacking forces for microtunnelling operations[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999, 14: 31–41.
- [9] OSUMI T. Calculating jacking forces for pipe jacking methods[J]. *No-Dig International Research*, 2000, 586: 40–42.
- [10] 纪新博. 沈阳地区砂土地层顶管顶力计算方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- JI Xinbo. Study on calculation method of jacking force of pipe jacking in sandy soil layer in Shenyang area[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [11] PELLET-BEAUCOUR A L, KASTNER R. Experimental and analytical study of friction forces during microtunneling operations[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2002, 17(1): 83–97.
- [12] STAHELI K. Jacking force prediction: An interface friction approach based on pipe surface roughness[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2006.
- [13] BENNETT R D. Jacking forces and ground deformations associated with microtunneling[D]. Illinois: University of Illinois, 1998.
- [14] 孙潇昊, 缪林昌, 林海山. 不同埋深盾构隧道开挖面稳定问题数值模拟[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(1): 164–169.
- SUN Xiaohao, MIAO Linchang, LIN Haishan. Numerical simulation research on excavation face stability of different depths of shield tunnel[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2017, 47(1): 164–169.
- [15] 王俊, 林国进, 唐协, 等. 砂土地层盾构隧道稳定性三维离散元研究[J]. *西南交通大学学报*, 2018, 53(2): 312–321.
- WANG Jun, LIN Guojin, TANG Xie, et al. Face stability analysis of shield tunnel in sandy ground using 3D DEM[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2018, 53(2): 312–321.
- [16] 桂智琛, 徐良骥, 刘潇鹏, 等. 基于时序 InSAR 的关闭矿井地表残余沉降监测[J]. *绿色矿山*, 2024, 2(1): 54–63.
- GUI Zhichen, XU Liangji, LIU Xiaopeng, et al. Monitoring surface residual settlement of closed mines based on time series InSAR[J]. *Journal of Green Mine*, 2024, 2(1): 54–63.
- [17] 万少锋. 基于滑移线法的隧洞掌子面稳定性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- WAN Shaofen. Face stability analysis of shield tunnel using slip line method[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.
- [18] 刘克奇, 丁万涛, 陈瑞, 等. 盾构掌子面三维破坏模型构建与极限支护力计算[J]. *岩土力学*, 2020, 41(7): 2293–2303, 2469.
- LIU Keqi, DING Wantao, CHEN Rui, et al. Construction of three-dimensional failure model of shield tunnel face and calculation of the limit supporting force[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(7): 2293–2303, 2469.
- [19] JI X B, NI P P, BARLA M. Analysis of jacking forces during pipe jacking in granular materials using particle methods[J]. *Underground Space*, 2019, 4(4): 277–288.
- [20] PEERUN M I, ONG D E L, DESHA C. A strategic review on enhanced DEM simulation and advanced 3-D particle printing techniques to improve pipe-jacking force prediction[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 123: 104415.
- [21] CHOO C S, ONG D E L. Evaluation of pipe-jacking forces based on direct shear testing of reconstituted tunneling rock spoils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141(10): 04015044.
- [22] 杨文义. 砂质黏土层中泥水平衡顶管施工顶力分析[J]. *煤炭学报*, 2006, 31(2): 159–162.
- YANG Wenyi. Analysis of thrust force by using slurry pipe jacking method in sandy clay soil[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(2): 159–162.
- [23] 郝传波, 于会军, 张国华, 等. 井下断层地质破碎带巷道堆积体垮落形态[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2016, 26(3): 251–255, 261.
- HAO Chuanbo, YU Huijun, ZHANG Guohua, et al. Caving forms of roadway deposit underground geological fault fracture zone[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2016, 26(3): 251–255, 261.
- [24] 梁艳坤, 隋旺华, 朱涛, 等. 哈拉沟煤矿垮落带破碎岩体溃砂的离散元数值模拟研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(2): 470–476.
- LIANG Yankun, SUI Wanghua, ZHU Tao, et al. Numerical simulation of quicksand through the broken rocks in caving zone due to coal mining based on DEM[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 470–476.
- [25] 李桂臣, 邵泽宇, 孙元田, 等. 煤矿掘采空间垮塌岩体稳定性与救援通道构建[J]. *绿色矿山*, 2024, 2(1): 11–20.
- LI Guichen, SHAO Zeyu, SUN Yuantian, et al. Stability of collapsed rock body in coal mine excavation space and construction of rescue channel[J]. *Journal of Green Mine*, 2024, 2(1): 11–20.
- [26] 郝传波, 于会军, 张国华, 等. 井下断层地质破碎带巷道垮落体力

- 学特性[J]. 黑龙江科技大学学报, 2016, 26(4): 351–357.
- HAO Chuanbo, YU Huijun, ZHANG Guohua, et al. Underground geological fault fracture zone of roadway collapse mechanical properties fall[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2016, 26(4): 351–357.
- [27] 黄松元. 散体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [28] HAO C B, LIU Z W, XIAO F K, et al. The movement characteristics of coal granular body in excavating rescue channel in the collapsed body[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 6: 4925828.
- [29] 陈福振, 李亚雄, 史腾达, 等. 三维圆柱型颗粒堆坍塌问题的全相态数值模拟[J]. *力学学报*, 2022, 54(6): 1572–1589.
- CHEN Fuzhen, LI Yaxiong, SHI Tengda, et al. Numerical simulation of full phases of collapse of threedimensional cylindrical granular pile[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(6): 1572–1589.
- [30] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [31] 杨科, 魏禄, 何祥, 等. 研石集料承载力力学特性模拟研究[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1087–1097.
- YANG Ke, WEI Zhen, HE Xiang, et al. Simulation experiment on bearing mechanical properties of gangue aggregate[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1087–1097.
- [32] 孙其诚, 王光谦. 颗粒流动力学及其离散模型评述[J]. *力学进展*, 2008, 38(1): 87–100.
- SUN Qicheng, WANG Guangqian. Review on granular flow dynamics and its discrete element method[J]. *Advances in Mechanics*, 2008, 38(1): 87–100.
- [33] 孙其诚, 刘晓星, 张国华, 等. 密集颗粒物质的介观结构[J]. *力学进展*, 2017, 47: 263–308.
- SUN Qicheng, LIU Xiaoxing, ZHANG Guohua, et al. The mesoscopic structures of dense granular materials[J]. *Advances in Mechanics*, 2017, 47: 263–308.
- [34] 付龙龙, 周顺华, 田志尧, 等. 双轴压缩条件下颗粒材料中力链的演化[J]. *岩土力学*, 2019, 40(6): 2427–2434.
- FU Longlong, ZHOU Shunhua, TIAN Zhiyao, et al. Force chain evolution in granular materials during biaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(6): 2427–2434.
- [35] 孙其诚, 王光谦. 静态堆积颗粒中的力链分布[J]. *物理学报*, 2008, 57(8): 4667–4674.
- SUN Qicheng, WANG Guangqian. Force distribution in static granular matter in two dimensions[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(8): 4667–4674.
- [36] 孙其诚, 金峰, 王光谦, 等. 二维颗粒体系单轴压缩形成的力链结构[J]. *物理学报*, 2010, 59(1): 30–37.
- SUN Qicheng, JIN Feng, WANG Guangqian, et al. Force chains in a uniaxially compressed static granular matter in 2D[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(1): 30–37.
- [37] 杨柳, 李飞, 王金安, 等. 综放开采顶煤与覆岩力链结构及演化特征[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(8): 2144–2154.
- YANG Liu, LI Fei, WANG Jin'an, et al. Structures and evolution characteristics of force chains in top coal and overlying strata under fully mechanized caving mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(8): 2144–2154.
- [38] TORDESILLAS A, MUTHUSWAMY M. On the modeling of confined buckling of force chains[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2009, 57(4): 706–727.
- [39] BAGI K, KUHN M R. A definition of particle rolling in a granular assembly in terms of particle translations and rotations[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2004, 71(4): 493–501.
- [40] LEŚNIEWSKA D, TORDESILLAS A, PIETRZAK M, et al. Structured deformation of granular material in the state of active earth pressure[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 157: 105316.
- [41] 蒋军, 徐正红, 徐凌峰. 颗粒体材料中的力链压曲变形[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(10): 1931–1937.
- JIANG Jun, XU Zhenghong, XU Lingfeng. Buckling deformation of force chain of granular material[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(10): 1931–1937.
- [42] ZHAO Y L, WANG Y X, WANG W J, et al. Modeling of non-linear rheological behavior of hard rock using triaxial rheological experiment[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 93: 66–75.
- [43] MU W Q, LI L C, YANG T H, et al. Numerical investigation on a grouting mechanism with slurry-rock coupling and shear displacement in a single rough fracture[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(8): 6159–6177.
- [44] FU Y L, XIE K, XIAO F K, et al. Motion characteristics of collapse body during the process of expanding a rescue channel[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(21): 11034.
- [45] PETERS J F, MUTHUSWAMY M, WIBOWO J, et al. Characterization of force chains in granular material[J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, 72: 041307.
- [46] SCHWAGER T. Computational Granular Dynamics: Models and Algorithms [M]. Softcover reprint of hardcover 1st ed., Springer: 2005.
- [47] 王金安, 杨柳, 李飞. 散体介质复杂力链网络演化持续同调拓扑研究[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(5): 728–736.
- WANG Jinan, YANG Liu, LI Fei. Topological study of persistent homology on complicated force chain network evolution in granular media[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(5): 728–736.
- [48] 徐正红. 颗粒物质的力链压曲变形及本构模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- XU Zhenghong. Research of the buckling deformation of force chain and constitutive model of granular materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [49] 戴北冰, 杨峻, 周翠英. 颗粒摩擦对颗粒材料剪切行为影响的试验研究[J]. *力学学报*, 2013, 45(3): 375–383.
- DAI Beibing, YANG Jun, ZHOU Cuiying. An experimental study on the effect of inter-particle friction on shear behavior of granular materials[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2013, 45(3): 375–383.
- [50] 段总样, 赵云华, 徐璋. 基于离散单元法和人工神经网络的近壁颗粒动力学特征研究[J]. *力学学报*, 2021, 53(10): 2656–2666.
- DUAN Zongyang, ZHAO Yunhua, XU Zhang. Characterization of near-wall particle dynamics based on discrete element method and artificial neural network[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(10): 2656–2666.