

# 插草刀盘将柔性草杆植入沙土阻力的影响因素

易跃, 刘扬九, 张恒宇, 刘春飞, 李艳洁

(北京林业大学 工学院, 北京 100083)

**摘要:** [目的] 初步探讨采用离散元法研究插草问题的可行性, 并定性分析插草阻力与刀盘运动速度间的关系, 为立体固沙车在进行草方格的机械化铺设工作时合理工作参数的选取提供可靠的理论依据。[方法] 利用离散元法建立了沙土颗粒—草带—刀盘构成的复杂系统的数值模型, 并模拟插草刀盘在沙土地表插草的动态过程, 分析刀盘插入速度、前进速度和草带密度等因素对插草阻力的影响。[结果] 插草刀盘所受到的插草阻力会随着间距的减小而增大, 随着前进速度和铅垂埋植速度的增大而增大。[结论] 离散元法可以用于分析沙土地表插草的数值模拟研究。

**关键词:** 离散元法; 颗粒; 柔性草带; 阻力; 数值模拟

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)06-0157-05

**中图分类号:** S288, S727.23

**文献参数:** 易跃, 刘扬九, 张恒宇, 等. 插草刀盘将柔性草杆植入沙土阻力的影响因素[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 157-161. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.026; Yi Yue, Liu Yangjiu, Zhang Hengyu, et al. Influence factors of resistance on disk inserting soft straws into sandy soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 157-161. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.026

## Influence Factors of Resistance on Disk Inserting Soft Straws Into Sandy Soil

YI Yue, LIU Yangjiu, ZHANG Hengyu, LIU Chunfei, LI Yanjie

(School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] In order to provide reliable theoretical foundation for the determination of reasonable working parameters for the machine of paving straw-checker sand barriers, the feasibility of inserting straws with Discrete Element Method (DEM) was investigated, and the relationship between the resistance of inserting straw and the speed of the disk blade was analyzed qualitatively. [Methods] A numerical model was built based on DEM for the complex system of sand particles, straws and disk blade, and the dynamic process of disk blade inserting straw was simulated with DEM. Besides, the influence factors on inserting resistance were discussed, such as inserting and moving velocities of disk and distance between straws. [Results] The inserting resistance of disk blade increases with the decrease of the distance between straws and the increase of horizontally moving velocity and vertical inserting velocity. [Conclusion] DEM can be applied to numerically study of straw-checkerboard paving on the surface of sand.

**Keywords:** discrete element method (DEM); particle; soft straw strip; resistance; numerical analysis

中国是世界上沙漠面积最广、受沙漠化危害最严重的国家之一, 防沙、治沙已成为中国生态环境建设中极其重要的浩大工程<sup>[1-4]</sup>。实践证明, 在沙漠中铺设草方格可以起到明显的防风固沙作用<sup>[5-9]</sup>。草方格是由人工或插草机将麦草、稻草、芦苇等植物茎干插入沙地中埋设成方格以达到控制沙丘流动、固沙治沙的目的<sup>[10]</sup>。在荒漠化现象日益严峻的今天, 仅靠人工铺设草方格无法进行大面积固沙。为了更高效地

铺设草方格沙障, 实现沙障铺设机械化与自动化, 刘晋浩等<sup>[11-13]</sup>研制了“防风固沙草方格铺设机器人”, 后经改进, 此机器最终成为“多功能立体固沙车”。该车能够实现草方格沙障的机械化铺设, 一次完成草方格的横向和纵向草带的铺设, 通过喷播种草、插植苗条, 实现生物治沙与工程治沙的完美结合。然而, 野外进行机械草方格铺设时, 铺设质量受多重因素共同影响, 来自车辆作业部件的重要参数有插草动力、刀盘

收稿日期: 2017-05-16

修回日期: 2017-06-13

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项“固沙插草阻力影响因素及其机理的 DEM 数值与试验研究”(2017ZY37); 国家自然科学基金项目(11202031)

第一作者: 易跃(1995—), 女(土家族), 重庆市, 本科生, 研究方向为机械设计制造及其自动化。E-mail: dolphiny2@163.com。

通讯作者: 李艳洁(1980—), 女(汉族), 辽宁省朝阳市人, 博士, 副教授, 主要从事离散元法数值计算及试验。E-mail: liyanjie@bjfu.edu.cn。

前进(即车辆前进)速度、刀盘的插草角度等;来自沙土和草秆的沙土和草秆含水率、沙土地表的土质硬度等,也会对草方格铺设过程产生重要而复杂的影响。而理清这些众多影响因素的影响规律和机理,是十分具有挑战性的艰巨任务。在研究固沙机械装备期间,装备的动力性能、几何结构、强度分析等参数并没有一定的量化标准,只能凭借经验和实地验证进行设计,造成设计周期长,成本高。固沙车在插草时的前进速度对草方格铺设质量的影响尤为明显,若速度太快,草沙障插入深度不够导致沙障寿命降低且刀盘翘起车辆使车辆平稳性降低;若速度慢,插入动力过大导致插草效率降低同时增大能耗。在这种应用背景的要求下,我们希望通过一种合理可行的数值方法对插草刀盘的阻力进行量化的计算分析,希望通过这种可行、可信的仿真计算来再现插草过程,探究插草刀盘、沙土与草体三者之间的相互运动与作用,建立松散干沙、草秆和刀盘整体的数值模型,为立体固沙车合理工作参数的选取提供可靠的理论依据。

离散元法(discrete element method, DEM)在土壤动力学的研究领域有着广泛的应用<sup>[14]</sup>,为了给复杂土壤动力学研究提供参数取值依据,众多国内外学者通常采用 DEM 仿真经典的力学试验来标定土壤的微观参数,如粘连特性、摩擦系数等。20 世纪 80 年代离散元法由王泳嘉引入中国,实现利用 Cundall 的离散元法进行岩石力学和颗粒系统的模拟,目前 DEM 的应用遍布各种领域,研究成果颇多<sup>[15-19]</sup>。目前,有学者<sup>[20]</sup>提出了草方格的简化模型,并分析得到了草方格边长尺寸与露出地表高度间的合理关系。还有一些关于草方格的防风性能影响的研究<sup>[21-22]</sup>,但是,未见有关于插草阻力的数值模拟研究,因沙漠地表沙土松软流动性和离散度大,因此采用 DEM 进行数值模拟沙土地表插草的过程是可行的。本文针对立体固沙车的插草刀盘将柔性草带插入沙地的过程,采用离散元法进行数值模拟,初步探讨采用该数值方法研究插草问题的可行性,并定性分析插草阻力与刀盘运动速度间的关系。

## 1 模型建立和参数选取

### 1.1 模型建立

1.1.1 草带模型的建立 由于土壤颗粒细小、数量多、结构复杂,为了简化计算,利用离散元软件 PFC3D 建模,采用圆球颗粒模型作为土壤颗粒的三维离散元模型<sup>[23]</sup>。因为沙漠地表沙土非常松散干燥,因此本文的数值模拟中沙土颗粒之间不增加黏性力。本文中的草带是针对含水率较高的( $\geq 20\%$ )柔性湿草,因

此采用 PFC3D 软件<sup>[24]</sup>中的接触粘连模型(contact bond model)将若干个等径球颗粒在接触点处进行添加法向和切向的接触粘连模型来实现柔性湿草的模型建立,草带的长度为 760 mm。接触粘连模型的法向和切向接触刚度的计算由公式(1)来决定。

$$k_n = \frac{k_n^{[A]} k_n^{[B]}}{k_n^{[A]} + k_n^{[B]}}, \quad k_s = \frac{k_s^{[A]} k_s^{[B]}}{k_s^{[A]} + k_s^{[B]}} \quad (1)$$

式中: $k_n^{[A]}, k_n^{[B]}$ ——表示颗粒 1,2 的法向接触刚度; $k_s^{[A]}, k_s^{[B]}$ ——颗粒 1,2 的切向接触刚度。

1.1.2 刀盘模型的建立 根据实际立体固沙车结构尺寸,利用 DEM 建模时选择直径为 600 mm,厚度为 20 mm 的插草刀盘模型;在实际铺设过程中,插草刀盘由牵引车拖拽在沙地上滚压,插草刀盘自身的运动包括围绕自身轴心的转动、跟随牵引车沿水平方向的进给运动和向下压埋运动。因此建模后赋予刀盘模型水平的前进速度、下压的铅垂速度和绕刀盘中心轴的转动速度,同时取绕轴心的转动角速度为  $753.98^\circ/\text{min}$ ,选择依据为实际刀盘转动速度,待刀盘模型下降低入土到一定深度后,把下压速度赋值为零。

刀盘实际工作时的受力分析图如图 1 所示,由受力图可知刀盘侧壁,圆柱壁面在工作过程中均受力,在数据处理时,分析单个方向的受力变化对刀盘实际所受阻力的研究意义不大,故采用同方向力代数值相加的方法计算阻力,计算由公式(2)来决定:

$$\begin{aligned} F_{\text{前进方向}} &= F_{X2} + F_{X3} - F_{X1} \\ F_{\text{铅垂方向}} &= F_{Y1} + F_{Y2} - F_{Y3} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $F_{X1}, F_{X2}, F_{X3}$ ——插草刀盘圆柱壁面、侧壁面 1 和侧壁面 2 前进方向的受力; $F_{Y1}, F_{Y2}, F_{Y3}$ ——插草刀盘圆柱壁面、侧壁面 1 和侧壁面 2 铅垂方向的受力。刀盘的受力实质为沙颗粒与刀盘壁面在接触点处的法向和切向力,随着刀盘入土深度的不断增加,与刀盘壁面接触的沙颗粒数量不断变化,则刀盘所受力为每个记录时刻下的与刀盘实际接触的沙土颗粒作用力的合力。

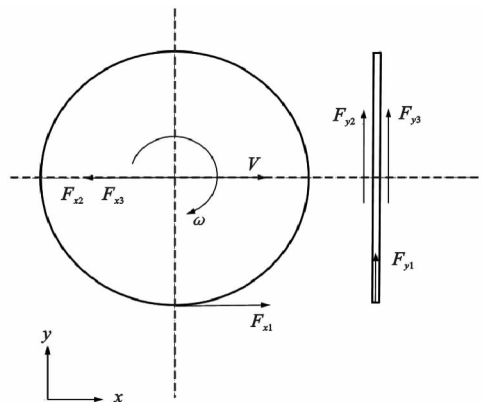


图 1 刀盘模型受力分析

1.1.3 有限壁面的建立 为了限制沙粒模型、草带模型及插草刀盘模型的生成及运动范围,在用 PFC3D 软件建模中选择三维空间坐标法建立有限壁面。为了尽可能模拟真实情况,把沙粒最终存在的有

效范围限定在  $1\ 000\ \text{mm} \times 800\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$  的长方体盒内。

## 1.2 参数选取

仿真时选取的土壤颗粒参数值如表 1 所示。

表 1 数值模型参数表

参数名称	摩擦系数	法向刚度系数/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	切向刚度系数/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	法向接触 粘连力/N	切向接触 粘连力/N	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	时间 步长/s	重力加速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
沙颗粒	0.2	104	104	0	0	2 650		
草带	0.2	108	108	107	107	100	$2.00 \times 10^{-4}$	9.8
刀盘	0.2	108	108	—	—	7 850		

## 2 模拟结果和讨论

在采用三维 DEM 分析圆盘插草刀的插草阻力过程中,不管裸露在沙地外的草杆长度多少和是否直立,在被插入至地下部分的草杆或草带给刀盘的阻力,都是由草杆与沙粒摩擦以及沙粒直接接触刀盘产生的,故柔性草带的插草阻力与干硬的草杆插草阻力在量级上是相当的。本文的研究重点是刀盘在插草过程中的阻力分析而非防风效果。因此,这种柔性草的插草阻力研究会为后续分析刚性草杆的插草阻力提供重要参考价值。利用 PFC3D 软件建立的模型、仿真的运动都是以立体固沙车的圆盘刀实际插草过

程为参照基础,以此得到插入至地下的草带给刀盘的阻力模型。DEM 模拟的插草过程如图 2 所示。其中,切取出土壤料床的中间剖面图再现了某时刻草带被插入至沙土内的状态。由图 2 可定性的观察出草带会随着刀盘的不断前进而依次被插入至土床内。

在实际的草方格铺设过程中针对不同的沙地情况、当地环境和草带原料等因素的影响,草方格的排布密度,牵引车的水平速度以及插草刀盘的铅垂速度都要进行相应的变化。本文仅对刀盘在不同水平前进速度和铅垂插草速度以及不同草带间距的工况下,刀盘在插草过程中所受到的阻力变化分别进行了讨论。

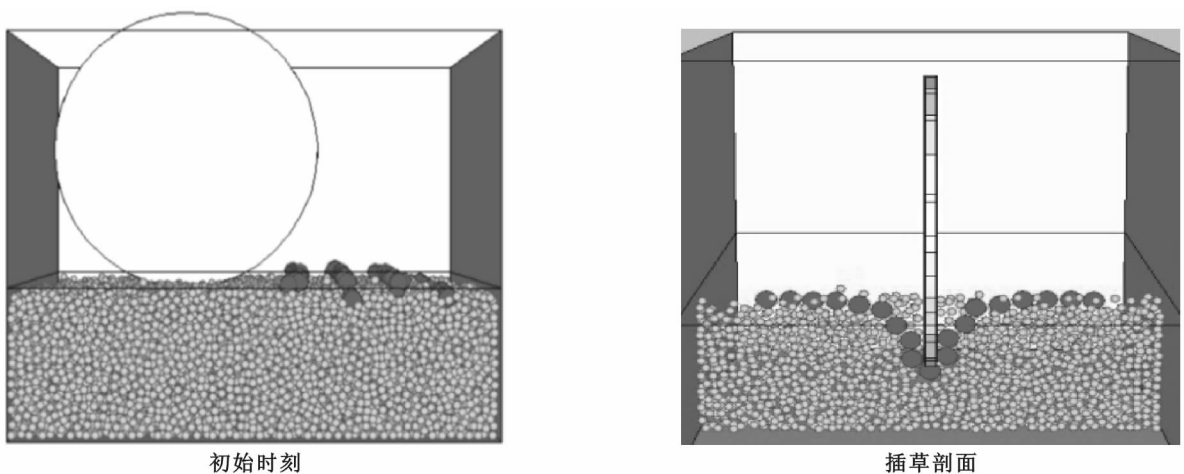


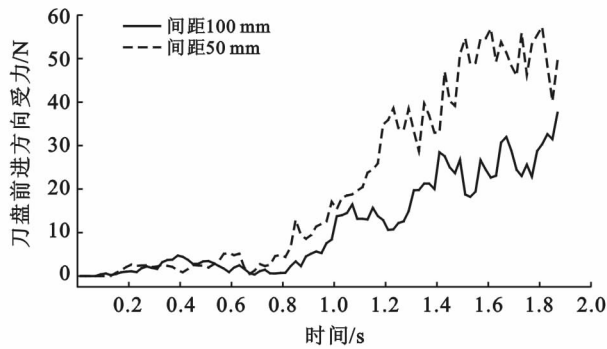
图 2 插草过程的 DEM 数值模拟

### 2.1 草带间距对阻力的影响

采用 100 和 50 mm 两种草带间距来定性地进行模拟。水平的前进速度和铅垂埋植速度保持不变,分别取值 0.2, 0.075 m/s。得到的水平前进阻力对比结果如图 3 所示。观察插草刀盘在埋植不同间距的草带颗粒模型,刀盘在前进和铅垂方向上受到的阻力

均与草带间距有关。刀盘的受力情况如图 3—4,刀盘圆柱面直接参与草带颗粒模型的下压运动与草带颗粒和沙土颗粒直接接触产生摩擦力,这是插草刀盘的埋植阻力的主要来源。刀盘在不同草带间距的条件下前进方向和铅垂方向的受力随着时间的推移,草带埋植间距较小的插草阻力有了十分明显的增大走

势。说明插草刀盘在草带埋植密度较大的条件下所受到的来自沙土颗粒和草带颗粒的摩擦力产生的阻力更大。



注:前进速度 0.2 m/s,铅垂速度 0.075 m/s。下同。

图 3 刀盘前进方向受力对比

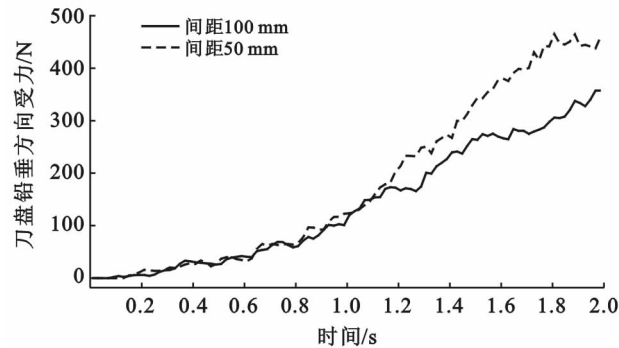
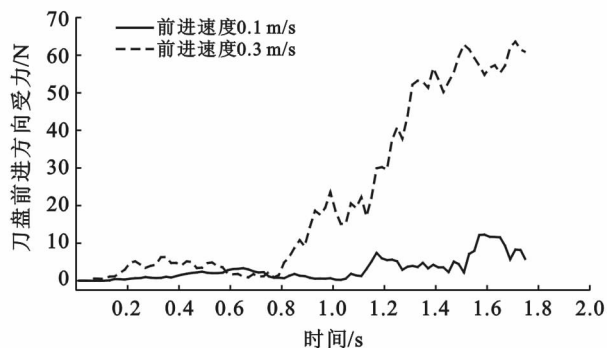


图 4 刀盘铅垂方向受力对比

## 2.2 前进速度对阻力的影响

本文分析了不同前进速度的插草刀盘的插草阻力。在保证草带颗粒模型间距和垂直方向向下的埋植速度不变的条件下对比了 0.1, 0.3 m/s 两个不同前进速度的插草阻力, 得到前进方向和铅垂方向的插草阻力如图 5—6 所示。由图 5—6 可见, 前进速度越快, 刀盘的前进阻力和铅垂插草阻力越大。刀盘水平向前运动与草带颗粒和沙土颗粒直接接触, 刀盘的前进速度越大, 刀盘与沙土颗粒接触以及沙土颗粒与草带相对运动产生的惯性冲击力越大, 导致阻力越大。



注:草带间距 100 mm,铅垂速度 0.075 m/s。下同。

图 5 刀盘前进方向阻力对比

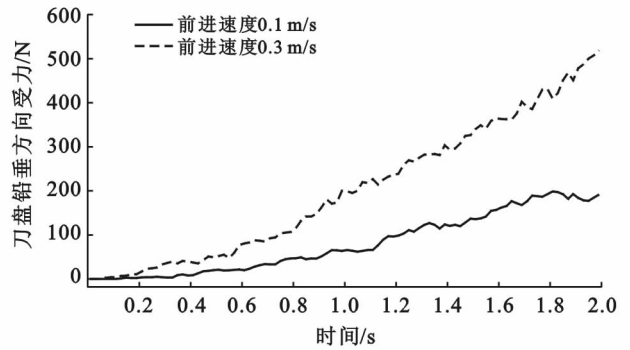
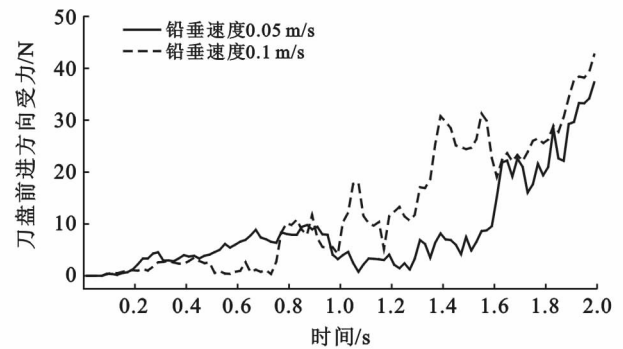


图 6 刀盘铅垂方向阻力对比

## 2.3 不同铅垂速度对阻力的影响

在实际的草方格铺设埋植过程中, 插草刀盘是放置在由牵引车牵引的机架上, 由液压缸推动, 将草方格插入沙地中 15—25 cm 的深度以达到固沙的目的。本文模拟了 0.05, 0.1 m/s 这 2 个不同铅垂插草速度的刀盘插草过程, 并比较了插草阻力。数值模拟得到数据结果如图 7—8。由图 7—8 可见, 插草速度大, 前进阻力和竖直的插草阻力均会明显增大。圆盘竖直向下运动直接与草带和沙粒接触产生摩擦力, 同时插草刀盘向下运动插草, 铅垂埋植速度较大的插草刀盘模型单位时间内向下运行的距离更大, 所以受到的来自草带和沙粒的摩擦力和惯性冲击力越大。



注:草带间距 100 mm,前进速度 0.2 m/s。下同。

图 7 刀盘前进方向受力对比

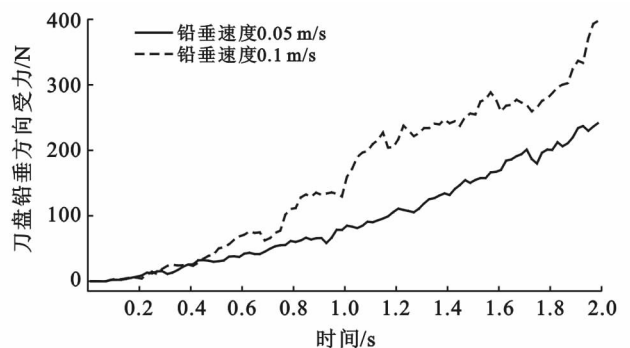


图 8 刀盘铅垂方向受力对比

### 3 结论

(1) 刀盘的水平 and 铅垂插草阻力随着草带间距的增大而减小。

(2) 刀盘的水平前进和铅垂插草阻力随着前进速度和铅垂插草速度的增大而增大。

(3) 本文为柔性草带的插草阻力研究,后续有待继续深入的分析干硬草秆作为研究对象的插草阻力研究,对比2种草体的阻力量级。

#### [参 考 文 献]

- [1] 马学喜,王海峰,李生字,等.两种固沙方格沙障的防护效益及地形适应性对比[J].水土保持通报,2015,35(2):344-349.
- [2] 陈其炯.行星传动中问题的探讨[J].兵工学报,1996(3):40-45.
- [3] 慈龙骏.我国荒漠化发生机理与防治对策[J].第四纪研究,1998(2):97-107.
- [4] 陆怀民,郭秀荣,赵志国等.防风固沙草方格铺设机器人沙漠通过性研究[J].中国工程机械学报,2006,4(4):389-393.
- [5] 郭秀丽,陆怀民.重型沙漠草方格铺设车总体设计与越野性研究[J].车辆与动力技术,2009(3):32-36.
- [6] 常兆丰,刘虎俊.河西走廊50年治沙措施应用中出现的问题及未来思路[J].中国沙漠,2001,21(S):87-91.
- [7] 冯学赞,张万军,曹建生,等.接坝地区沙地植被恢复与重建技术研究[J].水土保持研究,2004,11(3):73-75.
- [8] 张志芬,吴文奇,刘东升.通辽市风沙区水土流失现状及防治思路[J].中国水土保持,2001(6):29-30.
- [9] 王树力,刘玉山.赤峰市流动沙地植物沙障治理模式的研究[J].水土保持学报,2005,19(4):144-147.
- [10] 刘大为.草方格治沙的奥秘[J].力学与实践,2013(2):102-105.
- [11] 舒庆,刘晋浩.防风固沙草方格铺设机器人通过性研究[J].农业机械学报,2007,38(7):99-102,120.
- [12] 舒庆,刘晋浩.防风固沙草方格铺设机器人总体设计[J].农业机械学报,2007,38(6):199-201.
- [13] 刘晋浩,潘海兵,舒庆.草方格铺设机器人多体动力学仿真与试验[J].农业机械学报,2009,40(6):153-157.
- [14] Cundall P A, Strack O L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979,29(1):47-65.
- [15] Zhong Wenqi, Yu Aibing, Liu Xuejiao, et al. DEM/CFD-DEM modelling of non-spherical particulate systems: Theoretical developments and applications [J]. Powder Technology, 2016,302(1):108-152.
- [16] Lu G Third J R, Muller C R. Discrete element models for non-spherical particle systems:From theoretical developments to applications [J]. Chemical Engineering Science, 2015:425-465.
- [17] Smith William, Peng Huei. Modeling of wheel-soil interaction over rough terrain using the discrete element method[J]. Journal of Terramechanics, 2013,50(5/6):277-287.
- [18] 张华,黄晚清,游宏.离散单元法在岩土工程中的应用[J].成都大学学报,2016,35(12):410-414.
- [19] 王卫华,李夕兵.离散单元法及其在岩土工程中的应用综述[J].岩土工程技术,2005,19(8):177-181.
- [20] 王振亭,郑晓静.草方格沙障尺寸分析的简单模型[J].中国沙漠,2002,22(3):229-232.
- [21] 屈建军,喻文波,秦晓波. HDPE 功能固沙障防风效应试验[J].中国沙漠,2014,34(5):1185-1193.
- [22] 多孔介质方法对铁路沿线沙障模拟的适用性分析[J].铁道标准设计,2016,60(11):18-22.
- [23] Zhu H P, Zhou Z Y, Yang R Y, et al. Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments[J]. Chemical Engineering Science, 2007,62(13):3378-3396.
- [24] Itasca 2008. Theory and Background. PFC3D(particle flow code in 3D imensions), Version4.0 Minneapolis [M]. MN: Itasca Consulting Group Inc., 2002.