

特种成形

## 沙柳颗粒在不同破碎程度下致密成型的拱效应

李震, 沙潜毅, 李金达, 郭新宇  
(内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 生物质成型过程中大部分颗粒均处于高应力状态, 导致颗粒发生部分破碎。颗粒破碎改变了整体颗粒的级配特性, 对其宏观力学特性有着显著的影响。为了优化生物质成型过程, 需要建立微观与宏观之间的联系。通过 PFC3D 软件构建了单轴压缩模型, 研究了生物质在不同破碎程度下的成型过程, 探究了力链形成和拱效应对该过程的影响规律, 并分析了成型过程中的应力-应变曲线、动能变化和力链网络, 验证了颗粒破碎程度的增加可以从轴向上增加力链的数量, 破碎程度越大拱形结构的破坏越多。明确了颗粒的破碎会对力链网络以及拱形结构的演变产生一定的影响。

**关键词:** 沙柳颗粒; 拱效应; 破碎; 单轴压缩; 力链

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.02.014

**中图分类号:** TK6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 02-0111-07

## Arch effect for salix granules dense forming under different breakage degrees

Li Zhen, Sha Qianyi, Li Jinda, Guo Xinyu

(School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** During the forming process of biomass, most granules are in a high stress state, resulting in partial breakage of granules. Granule breakage changes the grading characteristics of the overall granule and has a significant influence on its macro and micro mechanical properties. In order to optimize the biomass forming process, it is necessary to establish a link between micro and macro. Therefore, a uniaxial compression model was constructed by software PFC3D, and the forming processes of biomass under different breakage degrees were studied, the influence laws of force chain formation and arch effect on the process were explored, and the stress-strain curve, kinetic energy change and force chain network during the forming process were analyzed to verify that the increasing of granule breakage degree increases the number of force chains in the axial direction, and the greater the breakage degree is, the more damage the arch structure is. Thus, it is clear that the granule breakage has a certain impact on the force chain network and the evolution of arch structure.

**Key words:** salix granules; arch effect; breakage; uniaxial compression; force chain

沙柳为广泛分布于内蒙古地区的一种沙生灌木, 因其具有“平茬复壮”的生物习性, 是发展生物质燃料的良好原料。但由于其贮存不便、运输成本高等缺点, 导致其难以利用。天然颗粒材料的固有特性(如脆性、天然缺陷)使得颗粒在受外力作用时, 特别是在高应力状态下会发生破碎, 同时颗粒的破碎也会影响颗粒间的胶结状态。霍丽丽等<sup>[1]</sup>通过研究颗粒的破碎情况获取了其宏观变量的演化规律。

颗粒破碎改变了颗粒集合体的级配特性, 对其宏、微观力学特性有着显著的影响<sup>[2]</sup>。近年来, 国内外大量学者使用离散单元法(Discrete Element Method, DEM)<sup>[3]</sup>进行颗粒破碎模拟, 其中基于DEM的颗粒破碎模拟主要包括胶结团簇法和颗粒替代法两类方式。

胶结团簇法<sup>[3-4]</sup>是由Potyondy D O等<sup>[5]</sup>提出的, 其基本思想为: 用胶结颗粒团簇内部的胶结破坏模拟颗粒破碎, 可预先设定颗粒内缺陷, 但原始颗粒数目巨大, 运算效率较低。刘汉龙等<sup>[2]</sup>使用不可破碎的“超级颗粒”模拟了颗粒的形状, 通过平行黏结方法将一定数量的小颗粒与“超级颗粒”连接, 用黏结失效模拟颗粒的破碎。

颗粒替代法<sup>[6]</sup>最早由Cleary P W<sup>[7-8]</sup>提出, 其基本思想为: 用特定级配的子颗粒代替母颗粒以模

收稿日期: 2022-04-16; 修订日期: 2022-07-15

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2020LH05020); 国家自然科学基金资助项目(51666016)

作者简介: 李震(1973-), 男, 博士, 教授

E-mail: lizhen\_730106@126.com

通信作者: 沙潜毅(1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1104598447@qq.com

拟颗粒破碎, 计算效率较高, 子颗粒级配可预先设定。目前, 对于颗粒的破碎准则和颗粒的替代模式还需要进一步的研究。De B J 等<sup>[9]</sup>认为当前的研究对于破碎准则的选取无法产生统一的结论, 在不同准则下的颗粒集合体孔隙率和级配演化的正确性还无法确定, 并对比了 4 种不同准则下的颗粒集合体的侧限压缩特性, 结果表明, 采用最大接触力作为阈值的判定准则效果较好。

生物质在成型之前需要进行预破碎, 并且在成型过程中也会发生颗粒的破碎。在宏观层面上, 颗粒的破碎有利于减少生物质燃料成型过程中的能量消耗, 有助于形成高质量的成型块; 颗粒破碎后也会引起整个体系的颗粒配位数发生改变。在微观层面上, 颗粒的破碎也会对力链网络以及拱形结构的演变产生一定的影响。

徐佳俊等<sup>[10]</sup>通过实验研究了粗粒土的颗粒破碎特性。田泽野<sup>[11]</sup>通过粗粒土大型直剪实验研究了破碎率与法向应力的关系。杨梅晓<sup>[12]</sup>通过 PFC3D 真三轴数值实验研究了单颗粒破碎对宏观整体产生的影响。

本文通过 PFC3D 软件建立离散元模型, 对不同破碎程度下的生物质颗粒成型过程进行分析, 探究了微观层次颗粒拱效应的影响。

## 1 离散元模型与仿真参数

国内外大量学者使用胶结团簇法对颗粒破碎进行了模拟, 周梦佳等<sup>[13]</sup>基于 PFC3D 程序研究了具有初始缺陷的单颗粒强度的尺寸效应; 杨贵等<sup>[14]</sup>基于 PFC2D 程序开展了单颗粒破碎的研究; Liu Y M 等<sup>[15]</sup>基于 PFC3D 程序开展了单颗粒破碎强度模拟实验,

通过平行粘结键生成球状颗粒簇代替原型圆颗粒。

本文使用颗粒替代法模拟生物质颗粒的破碎, 对比胶结团簇法, 其可以预先设定好破碎的比例, 可实现对颗粒进行二次破碎模拟。选取圆形颗粒进行模拟, 对比其他形状的颗粒, 圆形颗粒可以更容易地寻找到颗粒替代的方法。采用一定级配的子颗粒模拟母颗粒的破碎, 子颗粒的半径为母颗粒的 1/2。

参考原料颗粒间的接触属性和 PFC3D 软件中的接触模型, 颗粒之间选用可传递力与力矩的线性平行粘结接触模型 Linearbond, 颗粒与模具之间默认为线性接触模型 Linear。根据实际的仿真过程, 建立长径比为 5:1 的模具和上下加载墙体, 每隔 5 个时步记录一次数据。颗粒的基本属性如表 1 所示。

表 1 颗粒的基本属性

Table 1 Basic properties of granules

参数	材料	数值
相对模量	颗粒	$1.0 \times 10^9$
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	颗粒	650
	模具	—
孔隙率	颗粒	0.3
刚度比	颗粒	1.5
	模具	2.0
静摩擦因数	颗粒与颗粒	0.5
	模具与颗粒	0.5
接触识别距离/mm	颗粒与颗粒	$2.0 \times 10^{-3}$
	模具与颗粒	$2.0 \times 10^{-3}$

根据表 1 参数, 分别建立破碎颗粒占总颗粒数目 10%、20% 和 30% 的三维单轴压缩模型, 如图 1 所示。

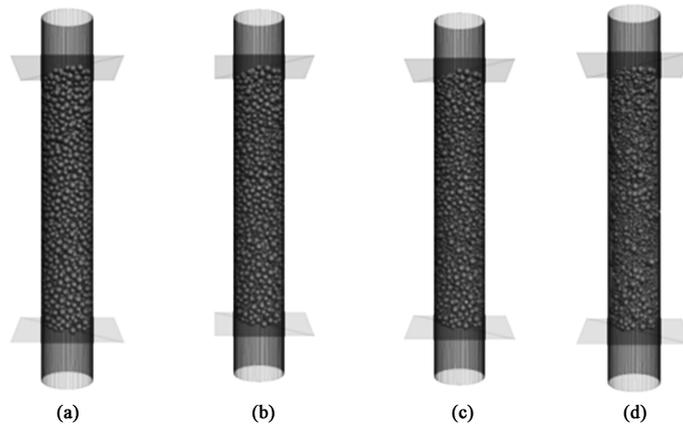


图 1 不同破碎程度的颗粒级配模型

(a) 未破碎 (b) 10% 颗粒破碎 (c) 20% 颗粒破碎 (d) 30% 颗粒破碎

Fig. 1 Grading model of granules with different breakage degrees

(a) Non-breakage (b) 10% granule breakage (c) 20% granule breakage (d) 30% granule breakage

## 2 成型所需的应力

对于大多数的生物质燃料成型,在进行单轴压缩之前均需要进行预处理,包括预加热和预破碎等。本文对不同破碎程度下的生物质原料进行了单轴下

的应力对比,如图2所示,其结果与李震等<sup>[16]</sup>通过实验与模拟得到的曲线趋势相同。由图2可知,在不同破碎程度的成型压缩过程中均存在应力突降的情况,其中,颗粒未破碎和10%颗粒破碎的情况下,仅在应变小于0.20时发生应力突降,即破碎的程度越高,受到拱效应的影响越大。

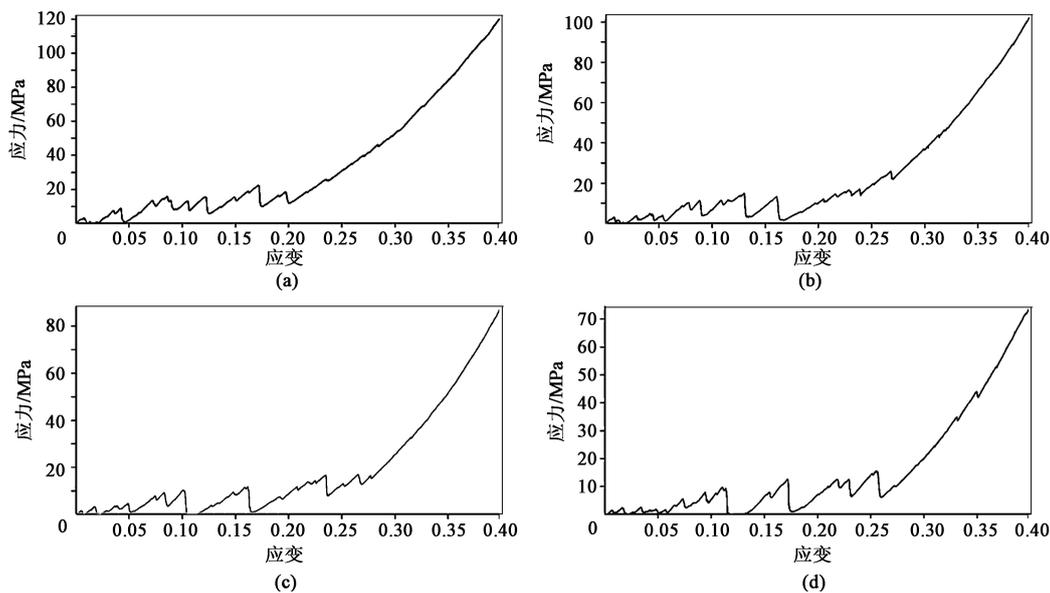


图2 不同破碎程度下颗粒级配的应力-应变曲线

(a) 未破碎 (b) 10%颗粒破碎 (c) 20%颗粒破碎 (d) 30%颗粒破碎

Fig. 2 Stress-strain curves of granules with different breakage degrees

(a) Non-breakage (b) 10% granule breakage (c) 20% granule breakage (d) 30% granule breakage

不同破碎程度下颗粒级配成型所需的最大应力分别为:122.1、100.2、88.8和74.4 MPa。对应颗粒的破碎程度越低,所需的最大应力越大。

## 3 成型过程中的动能变化

生物质成型过程是一个准静态过程,在压缩过程开始和结束时,颗粒的动能均为0,但是,可以通过压缩过程中颗粒动能的变化来研究颗粒的拱效应。不同破碎程度颗粒压缩过程中的动能变化如图3所示。

由图3可知,颗粒的动能在压缩开始和结束时几乎均为0,证实了压缩过程为准静态过程;但是,在成型过程中动能的变化为瞬态变化,不易通过实验进行测量。由图3可知,压缩至应变为0.05时,动能均发生了不同程度上的突增,颗粒之间的拱形结构发生了破坏,颗粒之间的间隙突然增加导致了动能的突然增加。与颗粒未破碎相比较,10%颗粒破碎和20%颗粒破碎均发生了最大动能的峰值前

移,分别在应变为0.175和0.130处,30%颗粒破碎反而发生了峰值后移。

对比不同破碎程度颗粒级配的动能图(图3a~图3d),颗粒未破碎情况下动能突变的次数最多,30%颗粒破碎情况下动能突变的次数最少,其中,动能的最大变化量为278 J,最小变化量为147 J,即30%颗粒破碎的情况下拱形结构发生破碎的次数最多,颗粒的破碎程度越高,拱形结构发生的破碎越少,受到应力拱效应的影响越大。

## 4 成型过程中的力链网络

颗粒之间接触会形成力链,力链之间交接进而形成力链网络,可以通过力链网络的动力学响应进一步反映成型颗粒的宏观力学性能。

不同破碎程度下的力链网络如图4所示,其中,力链的粗细代表颗粒之间接触力的大小,力链由细至粗代表接触力依次增大。对比不同破碎程度的力链网络(图4a~图4d),其中,力链强度最大的为

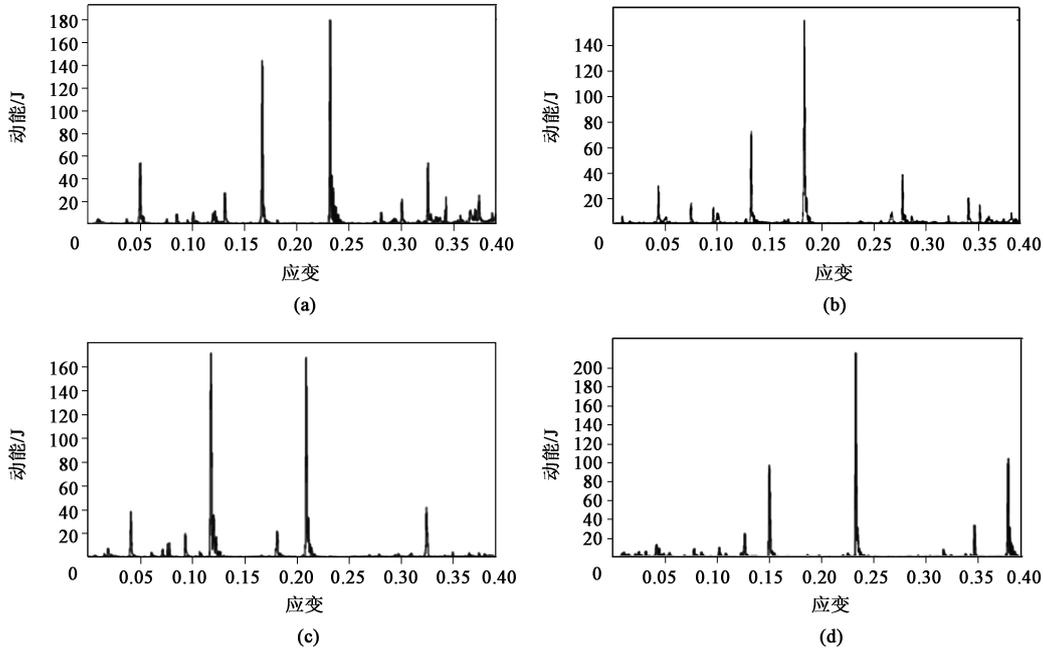


图 3 不同破碎程度颗粒级配的动能曲线

(a) 未破碎 (b) 10% 颗粒破碎 (c) 20% 颗粒破碎 (d) 30% 颗粒破碎

Fig. 3 Kinetic energy curves of granules with different breakage degrees

(a) Non-breakage (b) 10% granule breakage (c) 20% granule breakage (d) 30% granule breakage

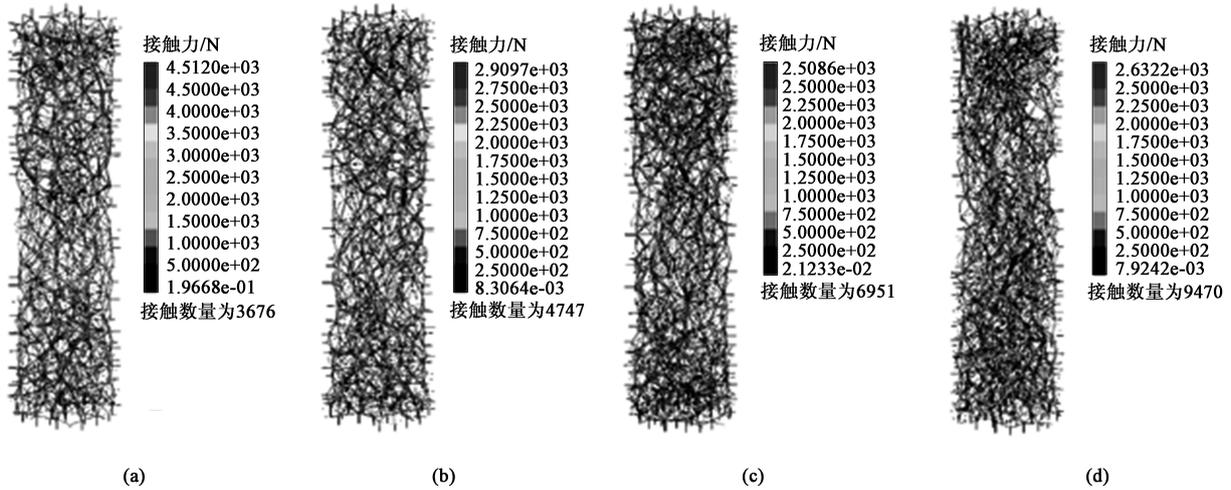


图 4 不同破碎程度的力链网络图

(a) 未破碎 (b) 10% 颗粒破碎 (c) 20% 颗粒破碎 (d) 30% 颗粒破碎

Fig. 4 Force-chain network diagrams of granules with different breakage degrees

(a) Non-breakage (b) 10% granule breakage (c) 20% granule breakage (d) 30% granule breakage

颗粒未破碎的情况，力链强度较小的为 20% 颗粒破碎和 30% 颗粒破碎的情况。由颗粒之间接触的数量来看，颗粒未破碎的情况接触的数量最少，为 3676 个接触；30% 颗粒破碎的情况接触的数量最多，为 9470 个接触。颗粒之间的最大接触力为 4512.0 N，出现在颗粒未破碎的情况下；颗粒之间的最小接触力为 2508.6 N，出现在 20% 颗粒破碎的情况下。

加载过程是上墙体由上至下进行加载，压力由

上至下进行传递，力链也是由上至下逐渐形成。因此，在成型完成时，力链主要集中在模型的上顶面和下底面处，中间部分的力链数量较少。模型的侧壁与颗粒之间形成了颗粒拱效应，故模具侧壁与颗粒形成的力链较少，力链的强度较大。由图 4 可知，颗粒未破碎的情况下，力链的强度较大，形成的力链数量较少，即受到拱效应的影响较大；30% 颗粒破碎的情况下，力链的强度较小，形成的力链数量

较多，即受到拱效应的影响较小。

为了进一步观察模型内部的力链分布，对模型进行了径向和轴向的截面图分析，如图5所示。由图5可知，在不同破碎程度下，压缩过程中的力链

数量在径向上相差不大。从轴向截面上看，力链的数量和颗粒的破碎程度成正相关，符合三维图像对应的结论，证明颗粒破碎程度的增加仅能从轴向上增加力链的数量，而径向上的力链数量变化不大。

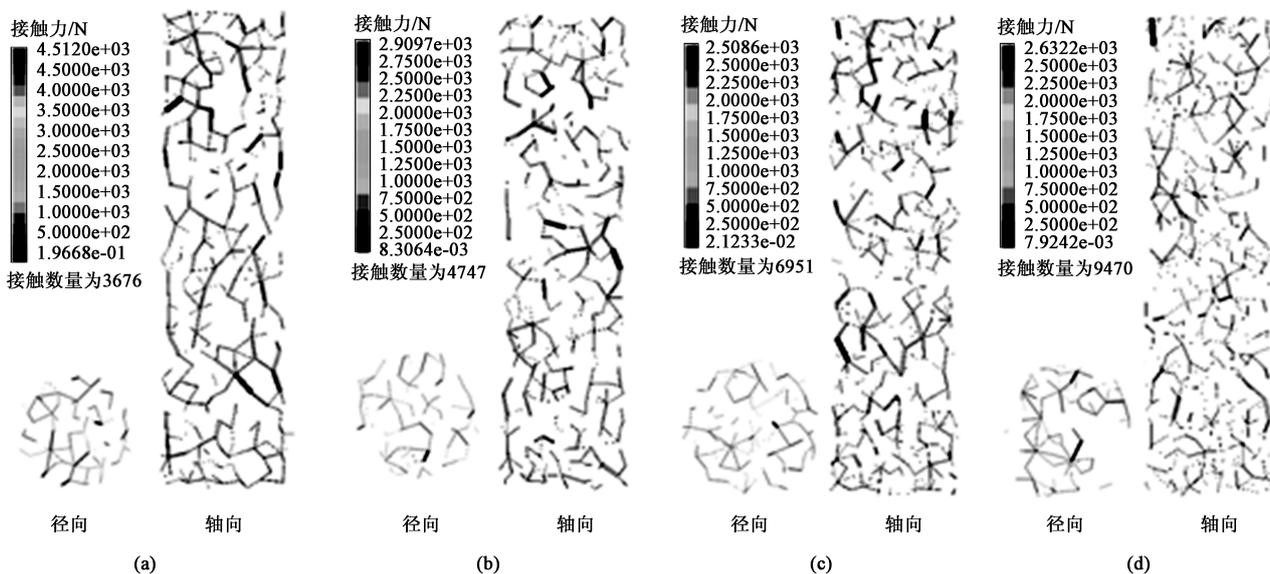


图5 不同破碎程度下颗粒力链网络图的轴向、径向截面图

(a) 未破碎 (b) 10%颗粒破碎 (c) 20%颗粒破碎 (d) 30%颗粒破碎

Fig. 5 Cross-section diagrams in axial and radial directions of force chain network for granules with different breakage degrees

(a) Non-breakage (b) 10% granule breakage (c) 20% granule breakage (d) 30% granule breakage

将三维力链网络截面图（图5）和二维力链网络（图4）进行对比，三维截面图虽然未能完整地展现，但是在一定程度上表征了力链的数量以及力链强度。三维截面图不能完整地反映拱形结构和“应力屏蔽”效应，二维力链网络也不能在空间上反映拱形结构。

## 5 力链接触方向频率分布图

在不同破碎程度下，对应变为0.20时力链的接触方向进行了记录，通过软件绘制了如图6所示的力链频率分布图。力链频率分布图表征成型过程中接触力角度的统计图，同时也能体现模型在各个角度上合力的大小。从图6a、图6c、图6e和图6g知，法向合力的方向基本均分布在90°附近，代表不同破碎程度下，其主应力方向均为轴向，与墙体的运动方向一致。

当破碎程度越高时，法向力链的频率分布越杂乱，更多的力链分布偏离主应力方向。相对于法向力链，切向力链的分布无明确的规律，切向合力的大小也远小于法向合力，因此，对整体成型过程影响较小。

## 6 结论

(1) 不同颗粒破碎程度压缩成型所需要的最大应力分别为：颗粒未破碎为122.1 MPa、10%颗粒破碎为100.2 MPa、20%颗粒破碎为88.8 MPa和30%颗粒破碎为74.4 MPa，即对应颗粒的破碎程度越低，所需的最大应力越大。其中，通过应力-应变图像也证实了，颗粒拱效应导致成型过程中会发生应力突降。

(2) 不同颗粒破碎程度压缩过程中的动能变化结果显示：当成型的应变达到0.05时，不同破碎程度的压缩均发生了动能的突变，动能的最大变化量为278 J，最小变化量为147 J。对比不同破碎程度的情况发现，破碎程度越大，动能的突变次数越多，即拱形结构的破坏越多。

(3) 不同破碎程度的压缩力链网络结果显示：由颗粒之间接触的数量来看，颗粒未破碎的情况接触的数量最少，为3676个接触；30%颗粒破碎的情况接触的数量最多，为9470个接触。颗粒之间的接触力最大为4512.0 N，出现在颗粒未破碎的情况

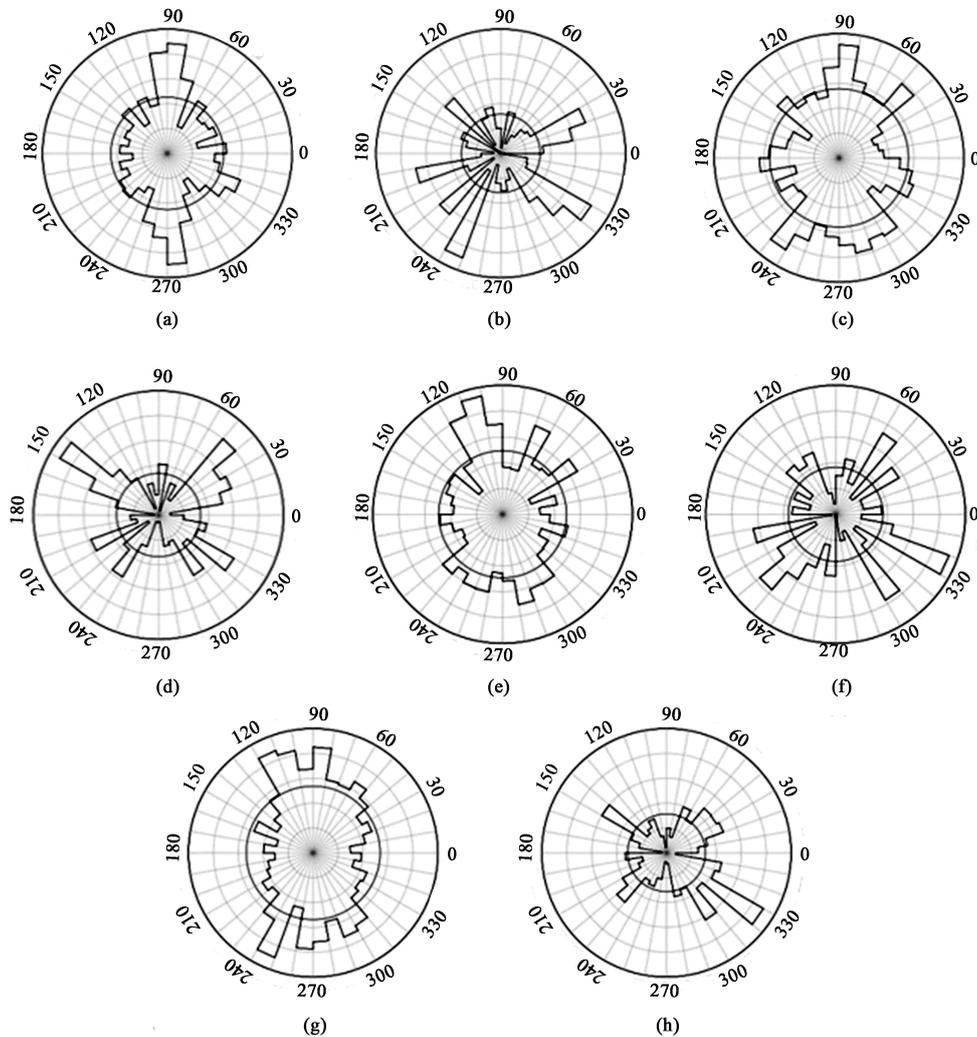


图 6 不同破碎程度和方向的力链频率分布图

(a) 未破碎, 法向 (b) 未破碎, 切向 (c) 10% 颗粒破碎, 法向 (d) 10% 颗粒破碎, 切向 (e) 20% 颗粒破碎, 法向  
(f) 20% 颗粒破碎, 切向 (g) 30% 颗粒破碎, 法向 (h) 30% 颗粒破碎, 切向

Fig. 6 Frequency distribution diagrams of force chain with different breakage degrees and directions

(a) Non-breakage, normal (b) Non-breakage, tangential (c) 10% granule breakage, normal (d) 10% granule breakage, tangential  
(e) 20% granule breakage, normal (f) 20% granule breakage, tangential (g) 30% granule breakage, normal  
(h) 30% granule breakage, tangential

下; 颗粒之间的接触力最小为 2508.6 N, 出现在 20% 颗粒破碎的情况下。

(4) 三维力链网络图结果显示: 不同破碎程度的压缩过程中, 力链数量在径向相差不大; 在轴向与颗粒的破碎程度成正相关, 符合三维图像对应的结论, 证明颗粒破碎程度的增加仅能从轴向上增加力链的数量, 而径向上的力链数量变化不大。

(5) 三维力链网络截面图与二维力链网络对比分析认为: 三维力链网络截面图虽然未能完整地展现但是在一定程度上表征了力链的数量以及力链强度。三维力链网络截面不能完整地反映拱形结构和“应力屏蔽”效应, 二维力链网络也不能在空间上

反映拱形结构。

#### 参考文献:

- [1] 霍丽丽, 赵立欣, 田宜水, 等. 生物质颗粒燃料成型的黏弹性本构模型 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (9): 200-206.  
Huo L L, Zhao L X, Tian Y S, et al. Viscoelastic constitutive model of biomass pellet [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (9): 200-206.
- [2] 刘汉龙, 孙逸飞, 杨贵, 等. 粗粒料颗粒破碎特性研究评述 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40 (4): 361-369.  
Liu H L, Sun Y F, Yang G, et al. A review of particle breakage characteristics of coarse aggregates [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40 (4): 361-369.

- [3] 徐琨,周伟,马刚,等.基于离散元法的颗粒破碎模拟研究进展[J].岩土工程学报,2018,40(5):880-889.  
Xu K, Zhou W, Ma G, et al. Review of particle breakage simulation based on DEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40 (5): 880-889.
- [4] 刘君,刘福海,孔宪京.考虑破碎的堆石料颗粒流数值模拟[J].岩土力学,2008,29(S1):107-112.  
Liu J, Liu F H, Kong X J, Particle flow code numerical simulation of particle breakage of rockfill [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (S1): 107-112.
- [5] Potyondy D O, Cundall P A. A bonded-particle model for rock [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41 (8): 1329-1364.
- [6] Matteo O C, Marcos A, Francesco C, et al. An approach to enhance efficiency of DEM modeling of soils with crushable grains [J]. Geotechnique, 2015, 65 (2): 91-110.
- [7] Cleary P W. Charge behavior and power consumption in ball mills: Sensitivity to mill operating conditions, liner geometry and charge composition [J]. International Journal of Mineral Processing, 2001, 63 (2): 79-114.
- [8] Cleary P W. Recent advances in DEM modeling of tumbling mills [J]. Minerals Engineering, 2001, 14 (10): 1295-1319.
- [9] De B J, McDowell G. Particle breakage criteria in discrete element modeling [J]. Geotechnique, 2016, 66 (12): 1014-1027.
- [10] 徐佳俊,陈宇龙,曾成华,等.加筋粗粒土直剪力学行为与颗粒破碎特性[J].有色金属:矿山部分,2017,69(4):52-56,103.  
Xu J J, Chen Y L, Zeng C H, et al. Mechanical behaviors and particle breakage features of reinforced coarse-grained soil in direct shear test [J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2017, 69 (4): 52-56, 103.
- [11] 田泽野.考虑颗粒破碎的粗粒土强度特性研究[D].北京:北京交通大学,2014.  
Tian Z Y. Study on Strength Characteristics of Coarse-grained Soils Considering Granular Crushing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [12] 杨梅晓.粗粒土颗粒破碎特性的离散元数值研究[D].大连:大连理工大学,2020.  
Yan X M. Numerical Study on Particle Crushing of Coarse-grained Soil Based on Discrete Element Method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [13] 周梦佳,温彦锋,邓刚,等.堆石料单颗粒劈裂试验破碎强度随机性与尺寸效应的三维离散元模拟[J].岩土力学,2019,40(S1):503-510.  
Zhou M J, Wen Y F, Deng G, et al. Three-dimensional discrete element simulation of random breaking strength and size effect in single particle splitting test of rockfill [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (S1): 503-510.
- [14] 杨贵,许建宝,刘昆林.粗粒料颗粒破碎数值模拟研究[J].岩土力学,2015,36(11):3301-3306.  
Yang G, Xu J B, Liu K L. Particle breakage characteristics of coarse aggregates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (11): 3301-3306.
- [15] Liu Y M, Liu H B, Mao H J. DEM investigation of the effect of intermediate principle stress on particle breakage of granular materials [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 84 (8): 58-67.
- [16] 李震,高雨航,刘彭,等.沙柳细枝颗粒致密成型过程中力链演变的离散元研究[J].太阳能学报,2019,40(11):3186-3195.  
Li Z, Gao Y H, Liu P, et al. Discrete element study on evolution of force-chain during salix grains dense molding [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40 (11): 3186-3195.

## 1 项锻压领域国家标准外文版获批发布

为贯彻、落实《标准联通“一带一路”行动计划》精神,推动我国的锻压产品和技术“走出去”,全国锻压标准化技术委员会积极开展推荐性国家标准外文版的翻译工作。

根据国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会于2022年12月28日发布的“2022年第18号”公告,1项由全国锻压标准化技术委员会组织翻译的国家标准外文版发布实施,见表1。

对于已发布的国家标准外文版,希望锻压行业内相关进出口业务较多的企业或相关检测机构能够积极推广、使用,助推我国标准“走出去”,提高我国标准的国际化水平,从而带动我国产品、技术、装备、服务“走出去”。

表1 1项锻压领域国家标准外文版发布信息

序号	标准中文名称(标准英文名称)	标准编号	翻译承担单位
1	温锻冷锻联合成形工艺 工艺编制原则 (Technological design principle for combined warm—Cold forging process)	GB/T 29535—2013 (EN)	上海交通大学、江苏森威精锻有限公司、江苏太平洋精锻科技股份有限公司、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司。