



多漏斗放矿过程散体介质接触力特性 量化研究

陈庆发^{1,2}, 刘 军¹, 刘恩江¹, 龙恩林²

(1. 广西大学 资源环境与材料学院, 南宁 530004;

2. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004)

摘 要: 本文基于离散元软件, 开展多漏斗放矿过程中散体介质接触力特性的量化研究。结果发现: 放矿过程中, 散体介质内部越靠近底部接触力集度越大, 不同类型接触力概率分布均呈指数式衰减, 且接触力强度的分布规律也具有较高的相似性; 放矿前中期接触力网络的方向偏向 y 轴方向(铅垂方向), 随着矿石颗粒不断放出, 接触力网络方向逐渐偏向 x 轴方向(水平方向); 放矿初期, 接触力沿 y 轴方向较大, 沿 x 轴方向接触力较小, 法向接触力主要集中在铅垂方向; 直至放矿中期, 与水平方向夹角为 30° 的法向接触力逐渐增多, 接触力分布的主方向由一个变为三个; 放矿后期, 与水平方向呈 45° 夹角的法向接触力逐渐增多, 接触力分布方向由三个转变为六个。

关键词: 多漏斗放矿; 散体介质; 接触力; 演化特征; 量化研究

文章编号: 1004-0609(2022)-07-2115-11

中图分类号: TD85-9

文献标志码: A

引文格式: 陈庆发, 刘 军, 刘恩江, 等. 多漏斗放矿过程散体介质接触力特性量化研究[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(7): 2115–2125. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-40089

CHEN Qing-fa, LIU Jun, LIU En-jiang, et al. Quantitative study on contact force characteristics of granular medium in multi-funnel ore drawing process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(7): 2115–2125. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-40089

采场内矿石颗粒的力学特性介于固体和液体之间, 在不同的条件下可表现出不同的特性^[1]。在传统的放矿理论中, 散体均被视为连续介质, 在此基础上将其受力情况、速度及密度等参数视为颗粒对应位置的相关函数, 并构建相应的数学模型, 在宏观层面研究散体介质的移动规律, 但并未从细观层面深入研究其内部复杂多变的力学响应。因此, 开展细观力学特性研究有助于进一步加强对散体介质宏观行为的理解和认识。随着颗粒力学研究逐渐成为新的热点, 众多国内外学者借助物理实验和数值

模拟技术, 基于离散元法、固体力学及流体力学等理论, 开展了大量的研究工作。KRISHNARAJ等^[2]研究了密集粒状物质和其他颗粒聚集物传递应力的方式, 发现颗粒接触网络是相互关联且接触基本是线性的。刘源等^[3]基于离散元法, 研究无缺陷颗粒系统集中载荷变化与有缺陷颗粒系统缺陷区域改变时, 颗粒间摩擦因数对颗粒系统底部接触力分布规律的影响; 结果发现, 随着摩擦因数增大, 无缺陷颗粒系统的底部接触力由双峰逐渐转变为单峰; 而有缺陷颗粒系统摩擦因数和缺陷尺寸均会对底部接

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51964003)

收稿日期: 2020-12-15; 修订日期: 2022-04-04

通信作者: 陈庆发, 教授, 博士; 电话: 0771-3232274; E-mail: chqf98121@163.com

触力产生影响,当缺陷尺寸逐渐增大,底部接触力峰值也随之增大。王金安等^[4]通过开展光弹颗粒试验,发现颗粒集合体组成力链的整体过程和分布规律;李震等^[5]建立了沙柳颗粒的离散元仿真模型,模拟颗粒间接触力随时间的变化规律,利用试验样品在布氏硬度机上测试由中心向外的硬度值,从侧面证明了力链的演变效应。刘小飞等^[6]基于离散元法构建边坡堆积体模型,并模拟金属板向下施加荷载时边坡失稳破坏的过程,分析了边坡力链网络的拓扑特征,得到了各参数在边坡堆积体失稳过程中的变化规律。ZHANG等^[7]开展了力链和应力传递的定量表征研究,发现力链的演化与应力分布具有相同的变化趋势。常明丰等^[8]选取五组刚性颗粒进行复写纸压痕试验,利用概率分析法研究单一粒径和不同级配下颗粒内部接触力的分布概率,相较于单一粒径颗粒,考虑级配的颗粒接触力分布概率均呈指数式衰减,且颗粒间形成强力链的比例相对较小。ZHANG等^[9]在准静态双轴加载和动态冲击加载条件下,分别研究力链在颗粒材料中的作用;结果发现,力链的形成和屈曲是影响试样强度及结构的主要因素,并且在动态试验中,力链屈曲数目与试样内部的能量耗散有关。

上述研究分别从不同角度研究散体介质的流动特性,揭示了散体介质中接触力的变化特性及规律。本文在此基础上,利用PFC^{2D}软件构建放矿数值模拟模型,结合理论分析和统计力学的有关知识,对放矿过程中散体介质的接触力特性表征参数进行研究,以期对相关领域的研究提供理论上的依据及参考。

1 数值试验模型的构建

在利用PFC^{2D}构建数值试验模型时,对模型内

所有颗粒进行描述的难度较大,即使全部计算,最终结果可能并不准确,因此可通过设置抗滚动摩擦因数来反映散体介质流动过程受颗粒自身形态的影响^[10]。在抗滚动线性接触模型中,抗滚动摩擦因数^[11]可使颗粒间接触时内力矩呈线性增长,转动能力会有所下降,可用来模拟非均匀矿岩抗转动的性质。为此,本文选择抗滚动线性接触模型模拟散体介质,用以抵消散体介质流动过程受颗粒形态的影响。

基于物理试验模型^[12],构建多漏斗放矿数值试验模型,其步骤如下。

1) 墙体生成:利用PFC^{2D}软件构建一个尺寸为168 cm×128 cm的放矿模型,其中放矿口间距为24 cm,模型由23面墙组成边壁,底部为7个放矿口,放矿口侧壁与水平面的夹角为45°,放矿口由21面墙组成,剩余2面墙为模型的边壁。

2) 初始颗粒生成:在模型y轴正方向0.08 cm到128 cm范围内生成矿石颗粒,重力加速度设为 $g=9.81 \text{ m/s}^2$,其力学参数如表1所示。初始模型设为线性接触模型,颗粒间摩擦因数设为0.3(经多次调试综合取值),以使模型尽可能充填密实,模型平衡后以10 cm为间隔对颗粒标定不同的颜色。

3) 计算颗粒生成:矿石颗粒的形状及大小均能对散体介质流动特性造成影响,为模拟该条件,将颗粒的接触模型转变为抗滚动线性接触模型,基于自然安息角数值试验^[13]和散体介质流动规律物理试验^[14],颗粒的力学参数可确定如表2所示。放矿口被打开后,矿石被逐渐放出,每经过一定时步,关闭放矿口并等待模型平衡后,再次打开放矿口放出颗粒;依次循环,直至将所有矿石颗粒放出。

通过PFC^{2D}软件构建的数值试验模型,如图1所示。

表1 墙体及初始矿石颗粒力学参数

Table 1 Mechanical parameters of walls and initial ore particles

Wall				Initial ore particle			
Tangential stiffness/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	Normal stiffness/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	Friction coefficient/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	Normal stiffness/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	Tangential stiffness/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	Friction coefficient	Ore particle density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Ore particle radius/ m
1×10^7	1×10^7	0.5	5×10^7	5×10^7	0.3	2800	0.008

表2 矿石颗粒的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of ore particles

Tangential stiffness/ (N·m ⁻¹)	Normal stiffness/ (N·m ⁻¹)	Friction coefficient	Rolling resistance linear friction coefficient	Ore particle density/ (kg·m ⁻³)	Ore particle radius/m
5×10 ⁷	5×10 ⁷	0.5	0.5	2800	0.008

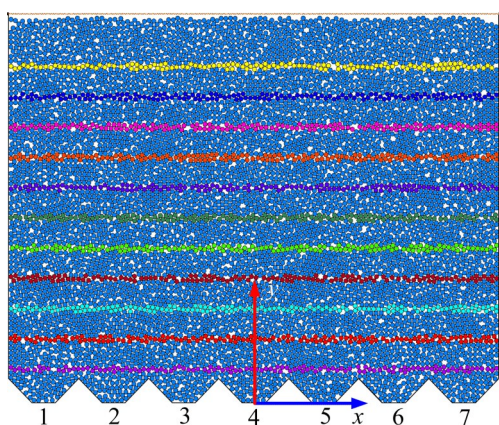


图1 放矿数值试验模型

Fig. 1 Numerical model of ore drawing

2 统计参数说明

描述接触力特性的参数有3种,即颗粒平均配位数、接触力概率分布密度和接触力分量比。

1) 配位数(Z),即散体介质内每个颗粒的平均接触数目,其大小可用于表征接触力的分布集度,其表达式如下^[15]:

$$Z = \frac{2N_c}{N_p} \quad (1)$$

式中: N_c 为散体介质中的接触个数(法向接触力大于0的接触); N_p 为颗粒个数。

2) 接触力分布概率密度(P_k^s),即描述散体介质流动过程颗粒间接触力强度特征的物理量,其对应分布概率函数(PDF)可从接触力的大小角度反映散体介质内部接触力的具体分布情况^[16-17]。本文以归一化处理总接触力为例,说明接触力概率密度的计算流程^[18]:

$$f_i^s = \frac{F_i^s}{\sum F_i^s / N} \quad (2)$$

利用式(2)对接触 i 总接触力归一化后,可得接触 i 总接触力归一化后的值;以0.5为间隔,划分若干个区间,统计每个区间内的总接触力个数,由此得出总接触力的概率密度如下:

$$P_k^s = \frac{N_k^s}{N^s} \quad (3)$$

式中: P_k^s 为 k 区间内总接触力的概率; N_k^s 为 k 区间内总接触力数量; N^s 为所有区间总接触力的数量。经计算可得到接触 i 法向接触力和切向接触力的概率密度,分别为 P_k^n 、 P_k^t 。

3) 接触力分量比(Q_c),即接触力在 x 轴方向与 y 轴方向分量的比值;该参数反映了颗粒体系运动及接触力网络形态整体延伸的方向性^[19],其表达式如下:

$$Q_c = \frac{\sum f_i^x - \sum f_i^y}{\sum f_i^x + \sum f_i^y} \quad (4)$$

式中: f_i^x 和 f_i^y 分别表示接触力 i 在 x 轴和 y 轴上的分量; Q_c 为接触力分量比。

3 散体介质接触力特性研究

3.1 散体介质宏观流动特征

在进行多漏斗放矿数值模拟时,每计算一定时步,记录并输出一批矿石颗粒的信息。整个过程中不同放矿次数的散体介质宏观流动特征如图2所示。

由图2可知,在放矿开始前,矿石颗粒紧密接触,各层标记矿石颗粒之间距离分布均匀。放矿初始阶段,矿石颗粒由下至上从放矿口逐渐放出,矿石颗粒保持平缓下移,但上部标记层矿石颗粒呈准直线下降,而下部标记层矿石颗粒则呈现出波浪状下降的状态,且越往下标记层矿石颗粒的振幅越大;随着放矿进行,下部各层标记矿石颗粒之间的距离逐渐减小,相互混杂;当放出量达到某一值时,矿房中各层标记矿石颗粒均呈波浪状下降,但上部标记层矿石颗粒之间的距离相对稳定,仍保持相对有序的状态,而下部各层标记矿石颗粒愈加杂乱无序;放矿后期,随着矿石颗粒不断放出,各标记层矿石颗粒均变为相互混杂的状态;放矿结束时,矿石颗粒呈波浪状分布在矿房内部,并出现脊

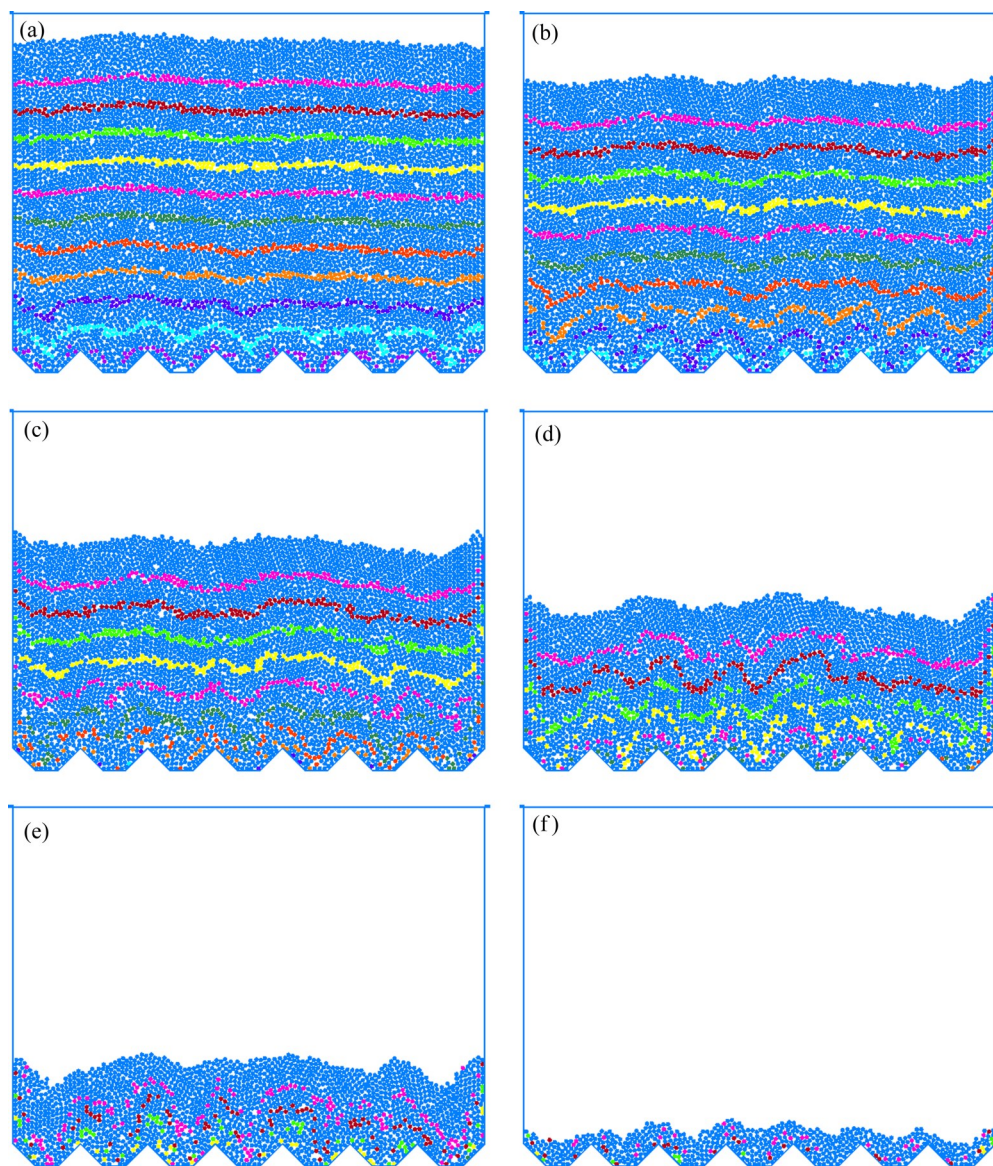


图2 多漏斗放矿过程散体介质宏观流动特性

Fig.2 Macroscopic flow characteristics of bulk media in multi funnel drawing process: (a) First ore drawing; (b) Third ore drawing; (c) Sixth ore drawing; (d) Ninth ore drawing; (e) Twelfth ore drawing; (f) Fifteenth ore drawing

部残留矿石的现象。

3.2 接触力集度分布特征

为便于描述多漏斗放矿过程接触力集度的变化规律,将介质体系划分为三层,每个分层放置半径为0.2 m的测量圆进行监测,测量圆中心空间坐标从上至下分别为 $(-0.56, 1.08)$ 、 $(0, 0.68)$ 、 $(0.56, 0.28)$,其可记录每次放矿时散体介质内相应位置配位数的变化过程,具体布置方式及不同放矿次数配位数的监测结果如图3所示。

由图3可知,第1次放矿结束后,受矿岩颗粒

自身重力的影响,不同部位配位数的数值存在一定差异(上层配位数保持在3.3左右,中层配位数保持在3.4左右,下层配位数保持在3.5左右),模型底部的配位数相对较大,对应接触力集度也较大。随着放矿的进行,原本处于相对稳定状态的散体介质受放出颗粒的影响,各层配位数变化规律也存在一定的异同:相同之处在于,不同层配位数均随着放矿次数增加逐渐减小;不同之处在于,在第6次放矿结束后,上层的矿石颗粒均被放出,该层的配位数变为0,且波动范围较大;中层配位数大致在第10次放矿结束时变为0;而下层配位数于第15次放

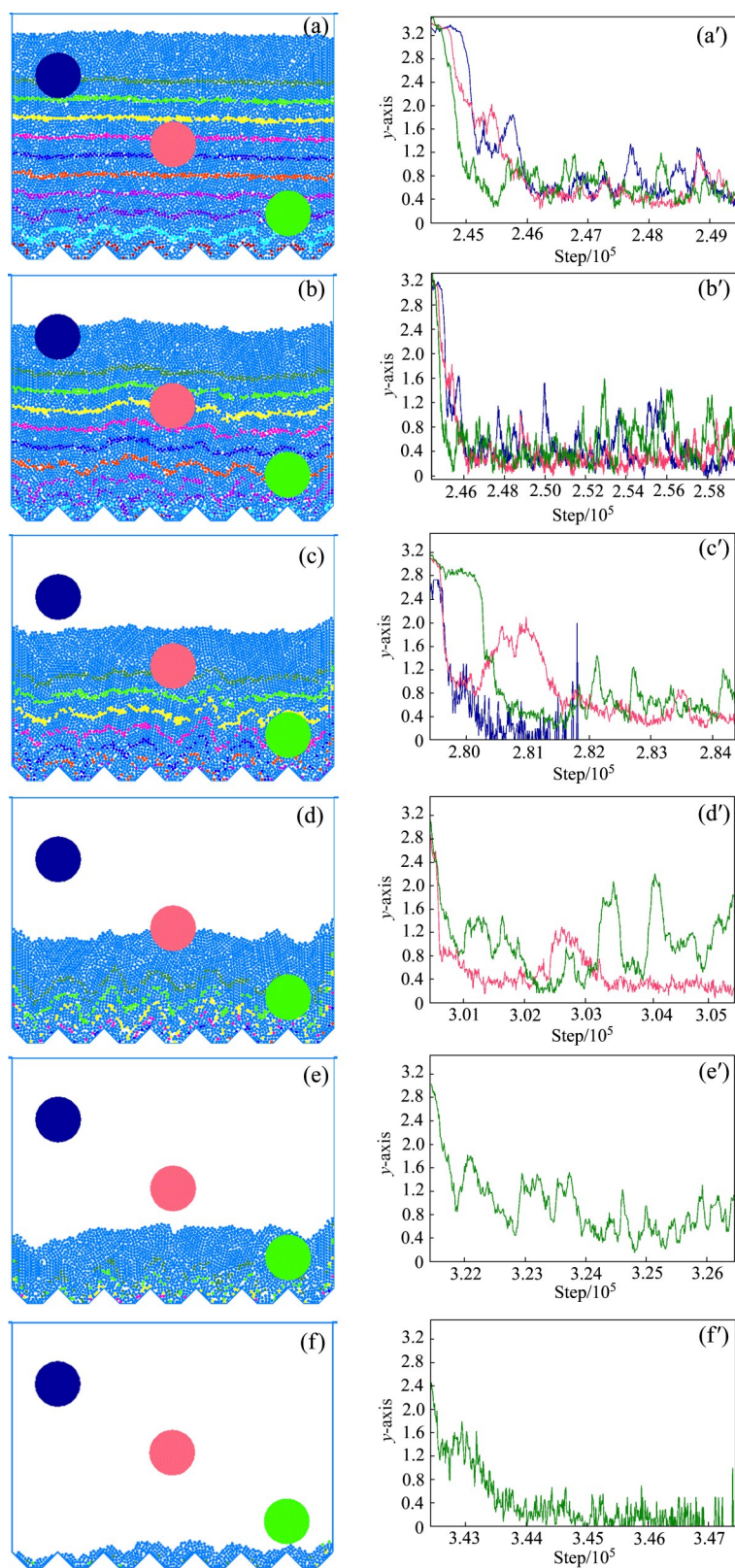


图3 放矿过程配位数变化

Fig.3 Coordination number change during ore drawing: (a), (a') Monitoring results of first ore drawing coordination number; (b), (b') Monitoring results of third ore drawing coordination number; (c), (c') Monitoring results of sixth ore drawing coordination number; (d), (d') Monitoring results of ninth ore drawing coordination number; (e), (e') Monitoring results of twelfth ore drawing coordination number; (f), (f') Monitoring results of fifteenth ore drawing coordination number

矿结束时变为0。

由上述分析知,多漏斗放矿过程中,随着放矿次数的增加,各层配位数均在波动中逐渐减小。就整个放矿过程而言,相同分层的配位数呈现出相似的变化规律,而不同分层的配位数则呈现出不同的变化规律。受矿岩颗粒自身重力的影响,体系内部不同部位接触力集度也不尽相同,表现出越靠近矿房底部接触力集度越大的现象。

3.3 接触力强度分析

基于多漏斗放矿过程散体介质的宏观流动特征,获取了不同放矿次数的颗粒间法向接触力、切向接触力和总接触力数据,利用式(2)、式(3)统计各放矿次数的颗粒间接触力的概率分布,结果如图4所示。

为了对多漏斗放矿过程接触力的概率分布特征进行定量描述,采用拟合函数的方式对以上统计数

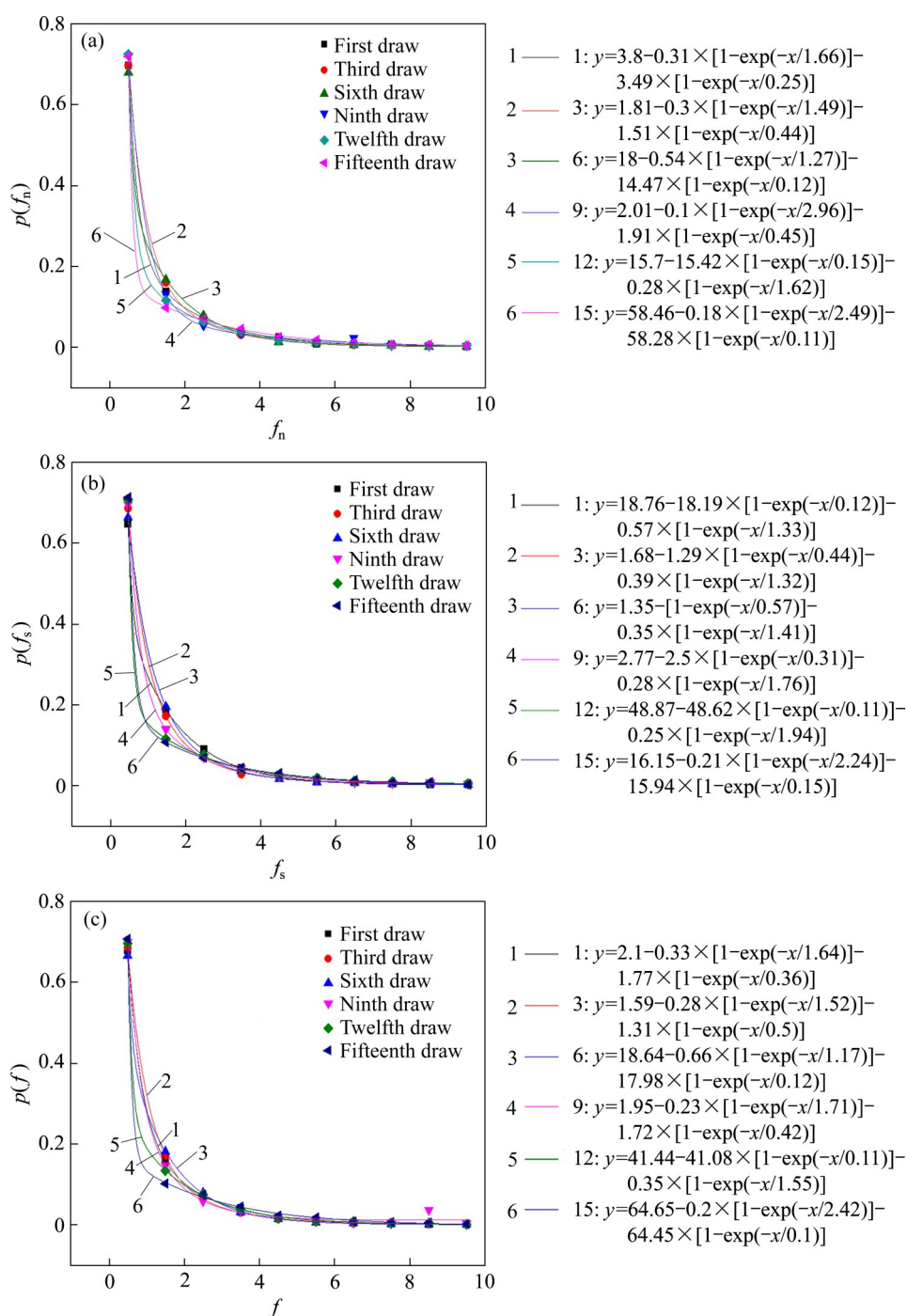


图4 接触力概率分布

Fig. 4 Probability distributions of contact forces: (a) Normal contact force; (b) Tangential contact forces; (c) Total contact forces

据进行拟合。由图4可见,采用归一化处理后,多漏斗放矿过程中三种接触力的变化规律均呈指数式衰减,而LIU等^[20]基于室内光弹试验也发现在玻璃球集合体内力链数量以指数形式减少的情况。利用函数 $y=A_1+A_2 \times \exp(-x/t_1)+A_3 \times \exp(-x/t_2)$ 对三种接触力进行拟合,拟合系数 R^2 均达到0.99以上,拟合效果较好。

通过法向接触力、切向接触力及总接触力的分布及相应的概率密度函数可知,多漏斗放矿过程各类接触力分布规律相似(均呈指数式衰减),表明散体介质内部强接触较少,大部分力链由弱力链组成,强力链与弱力链组成的力链网络维持着整个体系的平衡;同时,放矿过程中接触力强度分布规律也有较高的相似度,该现象说明散体介质内部力链不断进行着断裂重组的过程,强力链与弱力链相互转换,且被放出的颗粒大部分属于组成弱力链的颗粒。

3.4 接触网络形态演变规律

为了对放矿过程中接触力网络形态演化特征进行量化分析,利用式(4)对不同放矿次数时散体介质内部接触力在全局坐标下的 x 轴与 y 轴分量进行统计,如图5所示。

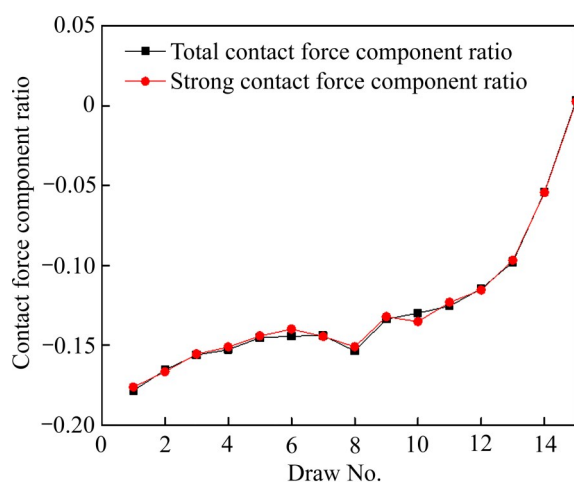


图5 不同接触力分量比变化规律

Fig. 5 Change law of component ratio of different contact forces

由图5可知,前14次放矿结束时,总接触力分量比与强接触分量比均小于0;当接触分量比 $Q_c < 0$ 时,表明接触力方向趋向于铅垂方向,且 Q_c 值越

小,趋向铅垂方向的程度越大。这表明前14次放矿结束前,由矿石颗粒组成的散体介质内部接触力网络的方向始终是偏向 y 轴(铅垂方向)。究其原因,放矿开始前散体介质处于原始平衡状态,因受颗粒自重的影响,使得体系内部接触力网络的方向始终是偏向 y 轴(铅垂方向);随着放矿的进行,矿石颗粒被逐渐放出,体系自身重力减小,且受放矿口、体系表面形态等因素的影响,总接触力分量比与强接触分量比逐渐增大;至第15次放矿结束时,体系内矿石颗粒较少,放矿口成为影响接触力网络方向的主要因素,总接触力分量比与强接触分量比均大于0;当接触力分量比 $Q_c > 0$ 时,其值越大则接触力越趋向水平方向,从而接触力网络的方向也偏向 x 轴(水平方向)。

同时,由图5还可知,多漏斗放矿过程中强接触力方向基本上与接触力网络方向相对应。由于下部矿石颗粒逐渐被放出,上部未放出散体颗粒逐渐变为松散状态,使得不同放矿次数的强接触力分量比与总接触力分量比呈现出相似的变化规律。

3.5 接触网络方向演变规律

以 10° 为一个区间,将 360° 划分为36个区间,统计区间内的颗粒接触数目及接触力。本文以法向接触力为例,绘制不同放矿次数下颗粒间接触力的统计分布图。同时,为了定量描述散体介质内部法向接触力的变化规律,利用式(5)对颗粒间法向接触力统计结果进行拟合^[21],拟合结果如图6和表3所示。

$$f_n(\theta) = f_0 \left[1 + a_n \cos \left(\pi \frac{\theta - \theta_n}{\omega} \right) \right] \quad (5)$$

式中: $f_n(\theta)$ 为颗粒间法向接触力的分布函数; f_0 为所有颗粒间法向接触力的平均值; a_n 为傅里叶系数,其大小表示法向接触力的各向异性程度; θ 和 θ_n 分别为力链分布的方向和主方向; ω 为三角函数周期控制系数。

由图6和表3可知,放矿初期法向接触力表现出明显的各向异性,即沿 y 轴方向平均接触力大于沿 x 轴方向平均接触力,法向接触力主要集中在铅垂方向,与水平呈 30° 夹角的法向接触力数量逐渐增多,接触力方向由一个变为三个;在放矿后期,

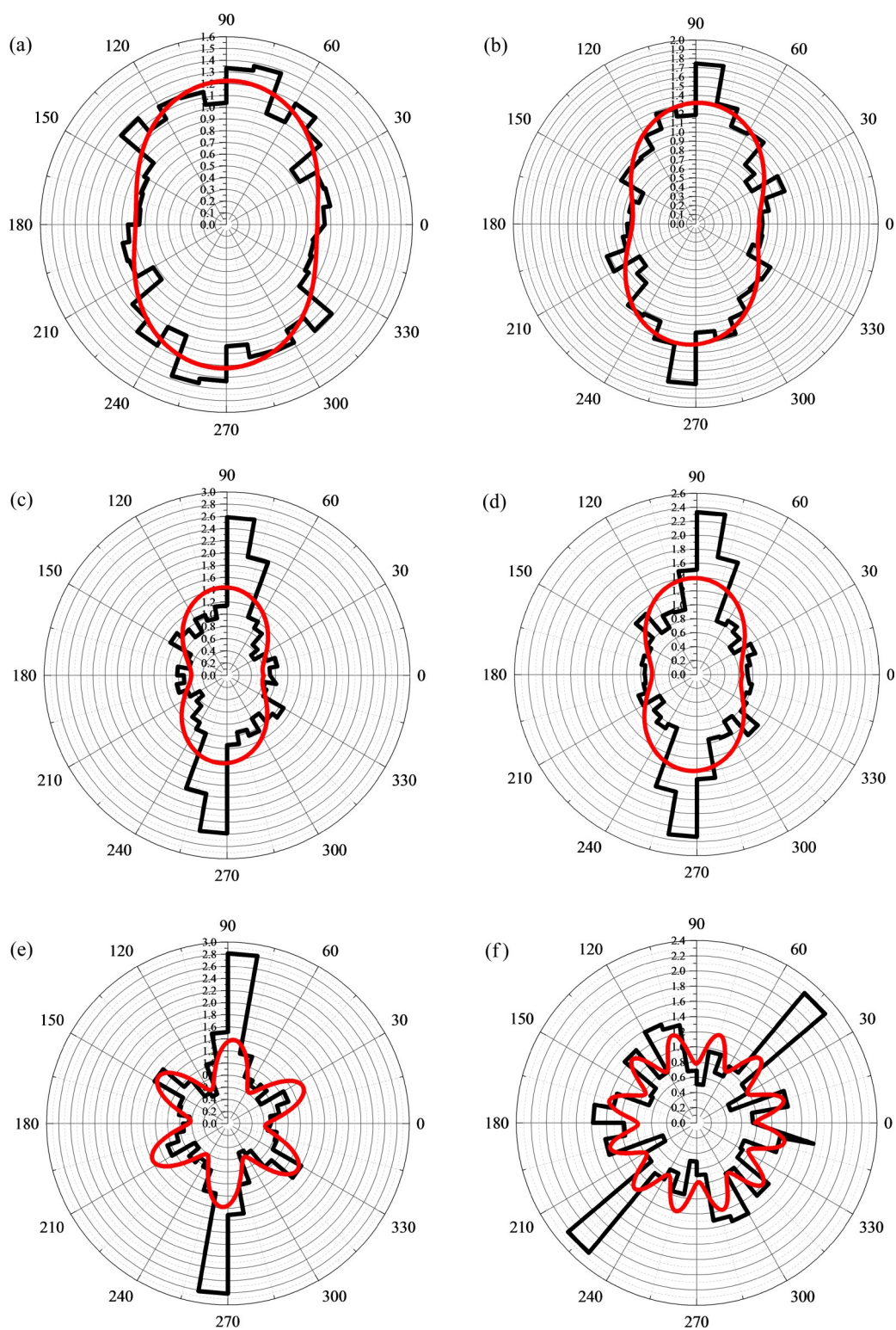


图6 不同放矿节点条件下法向接触力分布图

Fig. 6 Distribution of normal contact force under different drawing nodes: (a) First ore drawing; (b) Third ore drawing; (c) Sixth ore drawing; (d) Ninth ore drawing; (e) Twelfth ore drawing; (f) Fifteenth ore drawing

与水平呈 45° 夹角的法向接触力数量逐渐增多，接触力方向由三个变为六个。根据拟合结果可知，第1次放矿到第9次放矿结束时，颗粒间法向接触力

方向的分布拟合图形呈花生状，各向异性程度 a_n 的值由0.22增加至0.42，法向接触力的主方向也一直保持在 90° 左右；而从第9次放矿开始直至第12次

表 3 放矿过程中法向接触力方向分布的拟合结果**Table 3** Fitting results of normal contact force distribution in ore drawing process

Ore drawing time	f_0	a_n	θ_n	ω
1	1.00	0.22	87.12	90
3	1.00	0.31	86.84	90
6	1.00	0.37	88.58	90
9	1.00	0.42	88.14	90
12	1.00	0.38	44.28	30
15	1.00	0.25	28.24	15

放矿过程结束, 与水平方向呈 30° 夹角的法向接触力数量逐渐增多, 法向接触力分布方向由铅垂方向转变成铅垂方向及与水平方向呈 $\pm 30^\circ$ 夹角方向, 接触力方向的分布图经拟合后呈花瓣状, a_n 值变为 0.38, 接触力主方向由 88.14° 变为 44.28° ; 在放矿后期, 与水平方向呈 45° 夹角的法向接触力数量逐渐增多, 接触力方向由三个转变为六个, 接触力方向的分布图经拟合后呈花瓣状, a_n 的值减小为 0.25, 接触力的主方向由 44.28° 变为 28.24° 。

综上所述, 在放矿初期, 法向接触力主要承受散体介质铅垂方向的载荷, 随着矿房内颗粒数量逐渐减少, 受矿石颗粒质量、放矿口侧壁及脊部残留矿石等因素的影响, 与水平方向呈 30° 夹角的法向接触力逐渐增多; 放矿后期, 因残留在矿房内的矿石颗粒数量较少, 漏斗口侧壁成为主要影响因素, 使得与水平方向呈 45° 夹角的法向接触力逐渐增多。

4 结论

1) 随着放矿次数增加, 因受颗粒自身重力的影响, 各层配位数均在波动中逐渐减小, 体系内部不同部位接触力集度呈现出越靠近矿房底部接触力集度越大的规律。

2) 不同类型接触力概率分布均呈指数式衰减, 变化规律相似, 且不同放矿次数下接触力强度分布规律存在较高的相似度, 这表明在放矿过程中体系内部在不断循环着力链断裂重组的过程, 但散体介质体系整体组成无太大变化。

3) 前 14 次放矿结束至第 15 次放矿结束, 总接

触力分量比与强接触分量比由均小于 0 转变为均大于 0, 体系内部接触力网络方向由 y 轴偏向 x 轴, 表明整个过程强接触力主要承受铅垂方向的载荷, 且两种分量比总体上随放矿次数的增加而增大, 在变化规律上具有一致性。

4) 放矿初期平均接触力沿 y 轴较大, 而沿 x 轴较小, 方向主要集中于铅垂方向, 表现出明显的各向异性; 当矿石颗粒被逐渐释放, 与水平方向呈 30° 夹角的法向接触力数量逐渐增加, 平均接触力方向由一个变为三个; 在放矿后期, 与水平方向呈 45° 夹角的法向接触力数量逐渐增多, 方向由三个变为六个; 在整个放矿过程中, 颗粒间法向接触力分布拟合图形由花生状逐渐转变为花瓣状, 表明平均接触力的各向异性程度随接触角变化而逐渐增大。

REFERENCES

- [1] 马 炜. 散体介质冲击载荷作用下力学行为理论分析与算法实现[D]. 北京: 北京大学, 2008: 1-13.
MA Wei. Dynamical behavior of granular materials under impact[D]. Beijing: Peking University, 2008: 1-13.
- [2] KRISHNARAJ K P, NOTT P R. Coherent force chains in disordered granular materials emerge from a percolation of quasilinear clusters[J]. Physical Review Letters, 2020, 124(19): 198002.
- [3] 刘 源, 徐同桐, 赵宪锋. 粒间摩擦对含有点缺陷的二维颗粒堆积体底部力链的影响[J]. 力学与实践, 2019, 41(3): 308-313, 307.
LIU Yuan, XU Tong-tong, ZHAO Xian-feng. Effect of intergranular friction on the bottom force chain of two-dimensional particle piles with point defects[J]. Mechanics in Engineering, 2019, 41(3): 308-313, 307.
- [4] 王金安, 梁 超, 庞伟东. 颗粒体双轴加载双向流动力链演化光弹试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3041-3047, 3064.
WANG Jin-an, LIANG Chao, PANG Wei-dong. Photoelastic experiment on force chain evolution of particle aggregate under the conditions of biaxially loading and bilaterally flowing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3041-3047, 3064.
- [5] 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 Zhen, GAO Yu-hang, LIU Peng, et al. Discrete element study on evolution of force-chain during salix grains dense molding[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2019, 40(11): 3186–3195.
- [6] 刘小飞, 游世辉, 谢纯凯. 基于复杂网络的黏性土颗粒边坡堆积体失稳研究[J]. *应用数学和力学*, 2020, 41(9): 931–942.
- LIU Xiao-fei, YOU Shi-hui, XIE Chun-kai. Study on instability of clay granular slope piles based on complex network[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2020, 41(9): 931–942.
- [7] ZHANG Wei, ZHOU Jian, ZHANG Xue-ji, et al. Quantitative investigation into the relation between force chains and stress transmission during high-velocity compaction of powder[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2019, 74(7): 660–673.
- [8] 常明丰, 裴建中, 黄平明, 等. 考虑级配颗粒物质间接触力力链的分布概率分析[J]. *材料导报*, 2018, 32(20): 3618–3622.
- CHANG Ming-feng, PEI Jian-zhong, HUANG Ping-ming, et al. Analysis on the distribution probability of force chain of contact force among granular matter considering gradation[J]. *Materials Review*, 2018, 32(20): 3618–3622.
- [9] ZHANG L R, NGUYEN N G H, LAMBERT S, et al. The role of force chains in granular materials: from statics to dynamics[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2017, 21(7/8): 874–895.
- [10] WENSRICH C M, KATTERFELD A. Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM[J]. *Powder Technology*, 2012, 217: 409–417.
- [11] IWASHITA K, ODA M. Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(3): 285–292.
- [12] 陈庆发, 陈青林, 仲建宇, 等. 柔性隔离层下单漏斗散体矿岩流动规律[J]. *工程科学学报*, 2016, 38(7): 893–898.
- CHEN Qing-fa, CHEN Qing-lin, ZHONG Jian-yu, et al. Flow pattern of granular ore rock in a single funnel under a flexible isolation layer[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2016, 38(7): 893–898.
- [13] 刘欢, 任凤玉, 何荣兴, 等. 模拟矿岩散体的PFC细观参数标定方法[J]. *金属矿山*, 2018(1): 37–41.
- LIU Huan, REN Feng-yu, HE Rong-xing, et al. Calibration methods of the PFC microscopic parameters for simulating the loose ore rock[J]. *Metal Mine*, 2018(1): 37–41.
- [14] 陈庆发, 陈青林, 秦世康. 同步充填柔性隔离层下散体介质流理论[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2019: 26–32.
- CHEN Qing-fa, CHEN Qing-lin, QIN Shi-kang. Loose medium flow theory under a flexible isolated layer in synchronous filling mode[M]. Changsha: Central South University Press, 2019: 26–32.
- [15] 石崇, 张强, 王盛年. 颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 246–247.
- SHI Chong, ZHANG Qiang, WANG Sheng-nian. Numerical simulation technology and application with particle flow code (PFC5.0)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018: 246–247.
- [16] OSTOJIC S, SOMFAI E, NIENHUIS B. Scale invariance and universality of force networks in static granular matter[J]. *Nature*, 2006, 439(7078): 828–830.
- [17] AZÉMA E, RADJAÏ F. Force chains and contact network topology in sheared packings of elongated particles[J]. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2012, 85(3 Pt 1): 031303.
- [18] 张炜, 周剑, 于世伟, 等. 双轴压缩下颗粒物质接触力与力链特性研究[J]. *应用力学学报*, 2018, 35(3): 530–537, 687.
- ZHANG Wei, ZHOU Jian, YU Shi-wei, et al. Investigation on contact force and force chain of granular matter in biaxial compression[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2018, 35(3): 530–537, 687.
- [19] 王智勇. 平行板颗粒流摩擦系统的力链构型与演变研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013: 11–16.
- WANG Zhi-yong. Research on configuration and evolution of force chains in the frictional granular flow system filling in parallel plates[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013: 11–16.
- [20] LIU C H, NAGEL S R, SCHECTER D A, et al. Force fluctuations in bead packs[J]. *Science*, 1995, 269(5223): 513–515.
- [21] ROTHERBURG L, BATHURST R J. Discussion: Analytical study of induced anisotropy in idealized granular material[J]. *Géotechnique*, 1990, 40(4): 665–667.

Quantitative study on contact force characteristics of granular medium in multi-funnel ore drawing process

CHEN Qing-fa^{1,2}, LIU Jun¹, LIU En-jiang¹, LONG En-lin²

(1. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In this paper, the quantitative study of contact force characteristics of granular materials in multi-funnel ore drawing process was carried out based on discrete element software. The results show that, during the process of ore drawing, the closer to the bottom of the granular materials, the greater the contact force concentration; the probability distribution of different types of contact force in the process of ore drawing is in exponential form, and distribution law of contact force intensity is highly similar under the conditions of different drawing nodes. The direction of contact force network inside the granular materials is inclined to the y -axis direction (vertical direction) during the initial stage and medium stage of ore drawing, with the increase of ore drawing times, the direction of contact force network inside the granular materials is gradually inclined to the x -axis direction (horizontal direction). At the initial stage of ore drawing, the normal contact force shows obvious anisotropy, that is, the contact force along y -axis is larger than the contact force along x -axis direction, and the normal contact force mainly concentrates in the vertical direction. With the increase of ore drawing times, the normal contact force with an inclination angle of 30° to horizontal direction increases gradually, and the main distribution direction of contact force changes from one to three. At the later stage of ore drawing, the normal contact force with an inclination angle of 45° to horizontal direction increases gradually, and the distribution direction of normal contact force changes from three to six.

Key words: ore drawing from multi-funnel; granular medium; contact force; evolution characteristics; quantitative research

Foundation item: Project(51964003) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2020-12-15; **Accepted date:** 2022-04-04

Corresponding author: CHEN Qing-fa; Tel: +86-771-3232274; E-mail: chqf98121@163.com

(编辑 何学锋)