

DOI: 10.7652/xjtuxb201709015

颗粒流润滑力链演变及动力学状态的研究

孟凡净¹, 刘焜², 秦涛¹

(1. 湖北文理学院机械与汽车工程学院, 441053, 湖北襄阳; 2. 合肥工业大学摩擦学研究所, 230009, 合肥)

摘要: 为了研究颗粒流润滑状态下的力链演变及动力学状态, 基于非连续介质力学的离散单元法理论建立了剪切平行板间颗粒流润滑的分析模型, 并利用该分析模型研究了颗粒流润滑的接触力分布规律、力链网络的演变规律及动力学状态、力链的分布及对颗粒流润滑系统的影响。数值分析结果表明, 颗粒润滑介质间的法向接触力、切向接触力和接触力分布均按幂函数规律变化, 颗粒流润滑系统的承载和动力学特性主要受法向接触力的影响; 颗粒润滑介质的动力学状态可以转变为阻塞态、准静态流、慢速流和快速流 4 种状态, 在 4 种不同的动力学状态下, 总力链的大小在阻塞态、准静态流和慢速流时较大, 而在快速流时则较小; 在颗粒润滑介质的动力学状态从快速流转变为慢速流和准静态流时, 弱力链的数目明显减少, 超强力链和强力链的数目明显增加, 与此同时, 颗粒润滑介质的流动速度和力链解构与重构的速度则明显减缓。

关键词: 颗粒流润滑; 力链演变; 动力学; 接触力; 离散单元法

中图分类号: TH117 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)09-0106-06

Research on the Force Chain Evolution and Dynamic State of Granular Flow Lubrication

MENG Fanjing¹, LIU Kun², QIN Tao¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang, Hubei 441053, China; 2. Institute of Tribology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To reveal the force chain evolution and dynamic state under granular flow lubrication, an analytical model of granular flow lubrication between sheared parallel plates is established based on the discrete element theory of continuum mechanics. Using this analytical model, the contact force distribution rule, the force chain evolution rule and dynamic state, as well as the force chain distribution and its influence on the granular flow lubrication system, are studied. Numerical analytical results show that the probability distributions of normal contact force, tangential contact force, and contact between granular lubrication medium all obey the power law; the load bearing and dynamic characteristics of granular lubrication system are mainly influenced by normal contact force; and the dynamic state of granular lubrication medium can be transformed into four states of jamming state, quasi-static state, slow flow and fast flow. Under these four flow states, the magnitude of total force chain is large in the jamming state, quasi-static state and slow flow state, but small in the fast flow state. When the dynamic state of granular lubrication medium transforms from fast flow state to slow flow state or quasi-static state, the number of weak force chains is decreased and the number of strong and super force chains is increased. And in the meantime, the flow speed of granular lubrication medium as well

收稿日期: 2017-02-16。 作者简介: 孟凡净(1981—),男,博士,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51605150,11472096)。

网络出版时间: 2017-06-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170628.1709.012.html>

as the deconstruction and reconstruction speeds of force chains slows down.

Keywords: granular flow lubrication; force chain evolution; kinetic; contact force; discrete element method

颗粒流润滑是根据颗粒物质系统理论提出的一种新型的润滑方式^[1],该润滑方式环境适应性强,可适应超高温、高真空等极端工况环境,克服了油、脂润滑温度适应性差的问题^[2-3]。在摩擦学研究领域,颗粒流润滑已经引起人们的关注,国内外学者基于三体作用理论^[4]对颗粒流润滑问题开展了一些研究尝试。Heshmat 首次提出了颗粒流润滑的概念,并尝试性做了推力轴承的颗粒流润滑试验,通过试验发现颗粒流润滑会产生类似于流体润滑的动压效果^[5]。国内外摩擦学研究者们在温成形摩擦界面粉末润滑层宏微观特性、宏观流动和自扩散特性、摩擦学特性、黏滑流动特性^[6-9]等方面开展了研究工作。

力链是一种随机的网络结构,颗粒间相互接触形成的力链网络随时空演变具有明显的非均匀分布特征^[10],力链网络不仅与颗粒材料的形状、大小、摩擦系数、弹性模量、泊松比等密切相关,而且受颗粒体系的初始条件、边界条件、外部载荷等外界控制参数的影响,使得系统表现出非常复杂的传递性能,并且颗粒润滑介质的动力学状态具有显著的不确定性^[11]。迄今的成果表明了研究力链问题对颗粒流润滑的重要性,证明了颗粒流润滑系统中的力链与动力学状态、宏观本构之间的相关性,但是由于理论发展的滞后和试验手段的局限性,对颗粒流润滑系统中的力链演变规律和动力学状态问题还需要深入探讨,还未掌握力链网络的分布特征、演变规律和动力学状态之间的关联机制,导致不能有效控制和掌握颗粒流润滑的摩擦学特性。

因此,本文利用基于非连续介质力学的离散单元法理论,建立了颗粒流润滑的离散元数值模型,研究了颗粒流润滑状态下接触力的概率分布规律,力链网络的演变规律及动力学状态、力链的分布及对颗粒流润滑系统的影响。

1 颗粒流润滑离散元模型

为了分析颗粒润滑介质在剪切运动过程中的力链演变规律和动力学状态,建立了颗粒流润滑离散元模型,模型的长度 L 、宽度 B 分别为 1.7、0.85 mm,接触模型的建立采用 Hertz-Mindlin 方法,模型如图 1 所示。

模型的下摩擦副为一条无限长的线性墙体,在

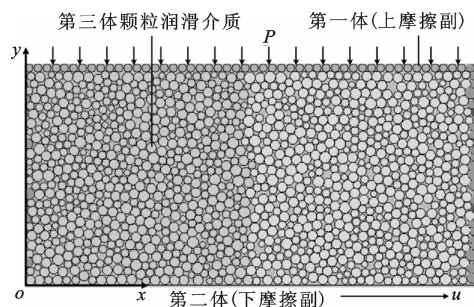


图1 颗粒流润滑离散元模型

模型建立的初始阶段,通过对模型反复初始化试验,选择合适的墙体参数,在模拟运算过程中,下摩擦副以速度 u 沿 x 向作剪切运动。模型的上摩擦副由黏接成板块的 50 个球形颗粒组成,允许上摩擦副沿坐标轴 y 向的微量移动,对上摩擦副添加 x 向和转动约束,并添加沿 $-y$ 方向的压力载荷 P 。模型中的颗粒润滑介质由 1 200 个直径在 $27 \sim 41 \mu\text{m}$ 之间的球形颗粒集合组成,直径大小均匀分布,且颗粒润滑介质间以及颗粒润滑介质与表面之间没有任何黏接,所有颗粒润滑介质在 z 方向的运动均处于被约束状态。

为了使颗粒润滑介质从坐标轴 x 向右侧出来时在其左侧以同样的速度和相对位置出现,特在模型 $L \times B$ 的区域内添加了周期性空间。如图 1 所示,模型中的上摩擦副材料为 1Cr18Ni 9Ti,下摩擦副材料为 45# 钢,颗粒润滑介质的材料为 SiC,上摩擦副的摩擦系数为 0,下摩擦副的摩擦系数为 0.5。上、下摩擦副和颗粒润滑介质的材料以及上、下摩擦副摩擦系数的选择都是基于对颗粒流润滑离散元模型反复初始化试验确定的。

2 离散元数值计算流程

颗粒流润滑中的颗粒润滑介质离散、不连续,无法用传统的连续性介质力学理论来分析解决。Cundall 等所提出的离散单元法应用于颗粒流润滑系统中能够很好解决该散体系统的分析问题^[12],国内外研究者利用该方法对颗粒物质系统进行了广泛的研究和探索^[13-14]。离散单元法的求解采用动态显式算法,在差分求解过程中无需转置刚度矩阵,不用直接求解切线刚度,不用平衡迭代,可使动态显式算法计算简单、计算速度快、求解容易、编制程序也比较简

单,离散元数值计算流程如图2所示。在离散元数值模型建立过程中,压力载荷 P 为2.5 MPa,上摩擦副密度、弹性模量和泊松比分别为 $7\,900\text{ kg/m}^3$ 、 $2.06\times 10^{11}\text{ Pa}$ 和0.3,颗粒润滑介质的密度、弹性模量和泊松比分别为 $3\,210\text{ kg/m}^3$ 、 $2.2\times 10^{11}\text{ Pa}$ 和0.142,下摩擦副法向刚度和切向刚度均为 $1\times 10^{10}\text{ Pa}$ 。

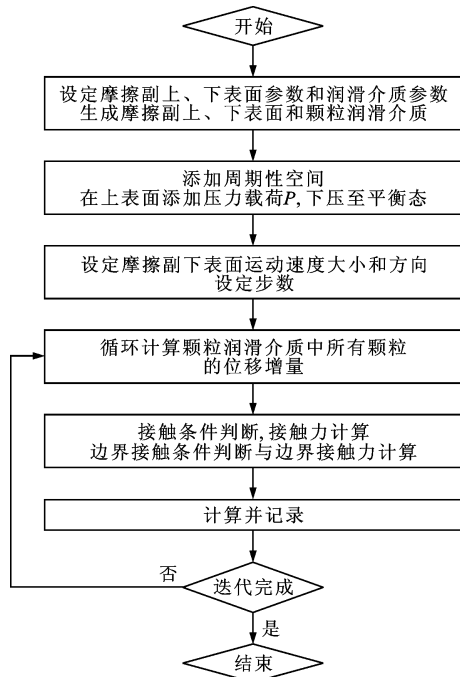


图2 离散元数值计算流程图

3 结果与讨论

3.1 接触力的分布规律

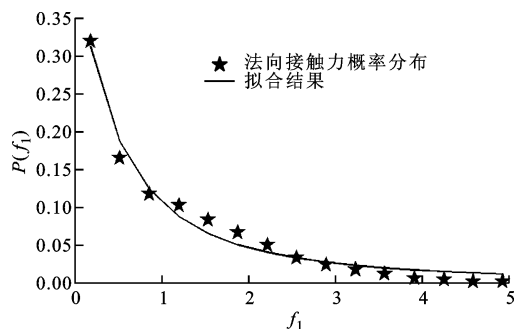
颗粒流润滑系统中,颗粒润滑介质间通过相互接触挤压形成力链网络,力链是颗粒流润滑系统所特有的一种结构,颗粒流润滑系统中的力链网络具有非均匀特性,且可以实现动态和静态承载。虽然颗粒流润滑系统中的力链网络杂乱无序,但是构成力链网络的接触力分布却有规律可循。

归一化法向接触力 f_1 、切向接触力 f_2 、接触力 f_3 和法向接触力概率分布 $P(f_1)$ 、切向接触力概率分布 $P(f_2)$ 、接触力的概率分布 $P(f_3)$ 分别定义为

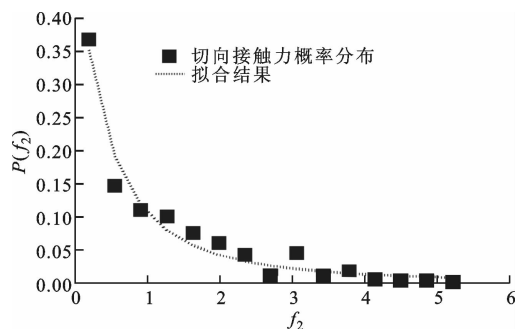
$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \frac{|F_{ij}^n|}{\sum_{i=1}^{1\,200} \sum_{j=1}^N |F_{ij}^n| / 1\,200N} \\ f_2 &= \frac{|F_{ij}^s|}{\sum_{i=1}^{1\,200} \sum_{j=1}^N |F_{ij}^s| / 1\,200N} \\ f_3 &= \frac{|F_{ij}|}{\sum_{i=1}^{1\,200} \sum_{j=1}^N |F_{ij}| / 1\,200N} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} P(f_1) &= \frac{R_m^n}{1\,200N} \\ P(f_2) &= \frac{R_m^s}{1\,200N} \\ P(f_3) &= \frac{R_m}{1\,200N} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

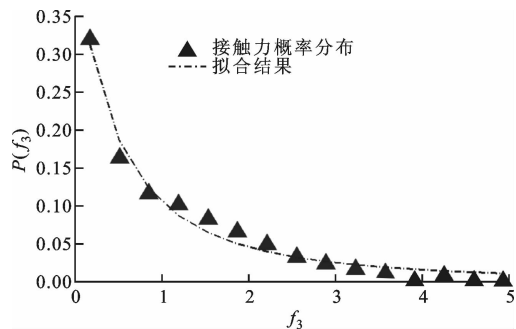
式中: N 为时步; F_{ij}^n 、 F_{ij}^s 、 F_{ij} 为第 i 个颗粒在第 j ($j=1, \dots, N$)时步时的法向接触力、切向接触力和接触力的大小; R_m^n 、 R_m^s 、 R_m 为法向接触力、切向接触力和接触力在第 m ($1\sim 15$)个等区间的接触力数目。下摩擦副剪切速度为 4.5 m/s 时,颗粒润滑介质间的法向接触力、切向接触力和接触力的概率分布如图3所示。由图3可知,法向接触力、切向接触力和接触力的概率分布均服从幂函数规律,即



(a)法向接触力



(b)切向接触力



(c)接触力

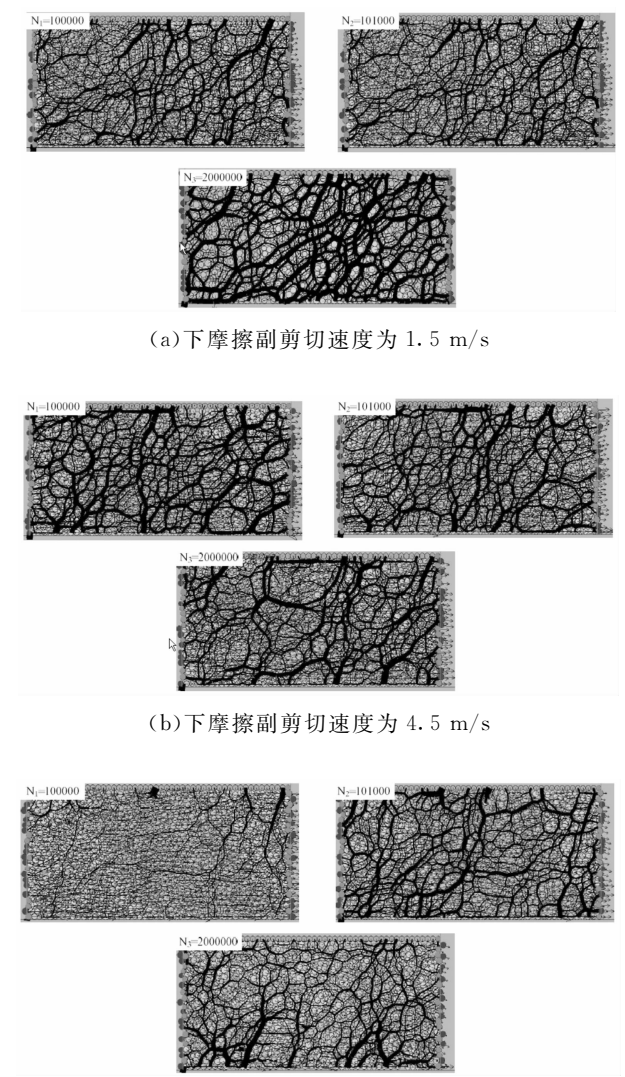
图3 接触力概率分布

$$P(f_i)=\begin{cases} a_1(1+f_1)^{b_1}, & i=1 \\ a_2(1+f_2)^{b_2}, & i=2 \\ a_3(1+f_3)^{b_3}, & i=3 \end{cases} \quad (3)$$

法向接触力概率分布的拟合系数 $a_1=0.431$ 、 $b_1=-2.034$ ，切向接触力概率分布的拟合系数 $a_2=0.513$ 、 $b_2=-2.294$ ，接触力概率分布的拟合系数 $a_3=0.431$ 、 $b_3=-2.037$ 。由拟合系数的数值可知，接触力的拟合系数数值与法向接触力的拟合系数数值非常接近，但是与切向接触力的拟合系数数值差距较大。通过计算可得，法向接触力的平均值大约是切向接触力平均值的 10 倍左右。由此可知，在颗粒流润滑系统中，系统的承载和动力学特性主要受法向接触力的影响。

3.2 力链网络的演变规律及动力学状态

下摩擦副的剪切速度为 1.5、4.5 和 15 m/s 时，颗粒流润滑系统随时步变化的宏观流动图如图 4 所



(c)下摩擦副剪切速度为 15 m/s

图 4 颗粒流润滑系统的流动图

示。由图 4 可知，下摩擦副的剪切速度越高，颗粒润滑介质的混合程度越好，说明颗粒润滑介质的流动速度越快，下摩擦副剪切速度越高，力链网络的变化越快，说明力链解构和重构的速度越快。

在颗粒流润滑系统中，颗粒润滑介质的动力学状态可以转变为阻塞态、准静态流、慢速流和快速流 4 种不同的动力学状态，颗粒润滑介质间的接触行为相应地从弹性接触、黏滑接触转变为惯性碰撞^[15]。颗粒润滑介质的动力学状态可以根据颗粒平均速度和速度比率的变化来确定，下摩擦副剪切速度为 1.5、4.5 和 15 m/s 时，颗粒润滑介质的平均速度和速度比率随时步的变化如图 5、6 所示。由图 5、6 可知，当下摩擦副剪切速度为 1.5 m/s 时，颗粒润滑介质的平均速度在 $A_1 \sim B_1$ 之间较小，为先增大然后减小到接近于 0，速度比率先增大然后减小到接近于 0，且在该阶段速度比率的平均值小于 25%，故把颗粒润滑介质的平均速度较小且平均速度比率小于 25% 的动力学状态定义为准静态流。颗粒润滑介质的平均速度在 $B_1 \sim C_1$ 之间为 0，且速度比率也为 0，故把颗粒润滑介质的平均速度和速度比率均为 0 的动力学状态定义为阻塞态。当下摩擦副的剪切速度为 4.5 m/s 时，颗粒润滑介质在 $A_2 \sim B_2$ 之间的平均速度先增大到一个较大值(2.87

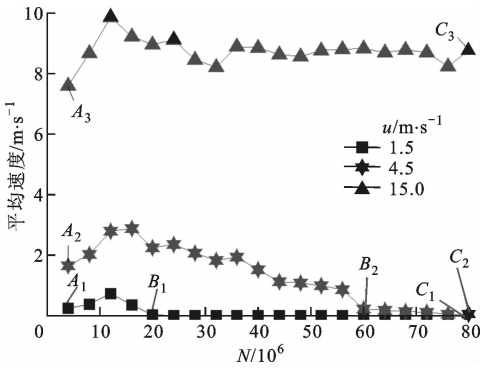


图 5 平均速度随时步变化图

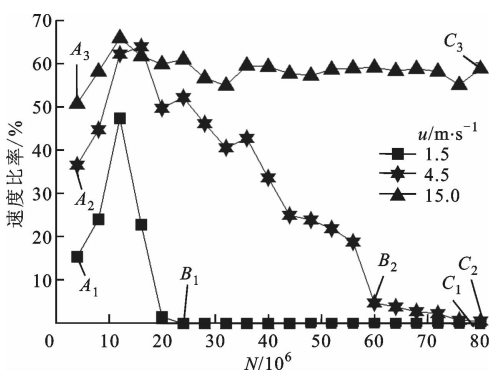


图 6 速度比率随时步变化图

m/s),然后逐渐减小到一个较小值(0.84 m/s),速度比率先增大到62%左右,然后逐渐下降,且平均速度比率为40.1%,故把颗粒润滑介质平均速度较大且平均速度比率在25%~45%的动力学状态定义为慢速流。之后在 $B_2 \sim C_2$ 之间,颗粒润滑介质的平均速度较小,且平均速度比率为2%左右,小于25%,故该阶段颗粒润滑介质的动力学状态符合准静态流特性。当下摩擦副剪切速度为15 m/s时,颗粒润滑介质的平均速度较大,速度比率的平均值为58.3%,故把颗粒润滑介质平均速度较大且平均速度比率大于45%的动力学状态定义为快速流。

在这4种不同动力学状态下,颗粒润滑介质间的力链网络遵循特定的演变规律。下摩擦副剪切速度为1.5、4.5和15 m/s时,颗粒润滑介质间的总力链大小随时步的演变规律如图7所示。当下摩擦副剪切速度较小时,颗粒润滑介质间的总力链较大,当下摩擦副剪切速度增大到15 m/s时,颗粒润滑介质间的总力链则会减小。不同速度时总力链随时步的变化如图7~9所示,当时步从0变化到 6×10^8 时,颗粒润滑介质的动力学状态为慢速流,颗粒润滑介质间的接触状态为黏滑接触。与准静态流和快速流状态相比,总力链大小始终维持在一个较大的数值范围内,且总力链大小随时步波动的波峰和波谷间的差值较大。这是因为力链的波动幅度与力链解构和重构过程中颗粒润滑介质弹性变形的变化密切相关^[15]。颗粒流润滑介质在慢速流状态下,力链重构过程中颗粒的弹性变形增长的幅度较大,而在力链解构过程中颗粒的弹性变形又可以得到较为充分的释放,因此造成力链波动的幅度变得较大。之后,由于颗粒润滑介质整体的流动速度变慢,颗粒润滑介质的动力学状态转变为准静态流。

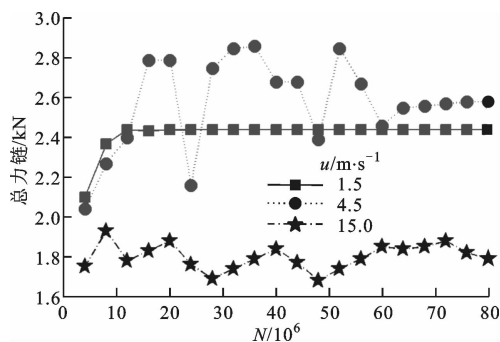


图7 不同速度时总力链随时步变化图

速度为15 m/s时总力链随时步变化如图10所示,与准静态流和慢速流状态时相比,颗粒润滑介质的流动速度更快,且力链解构和重构的速度更加快。

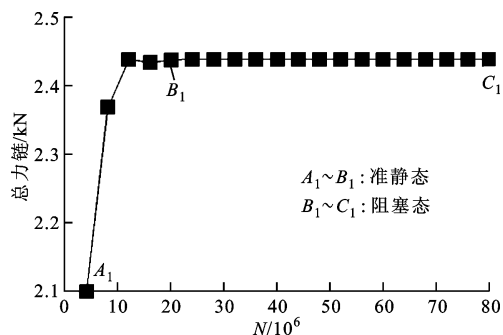


图8 $u=1.5$ m/s时总力链随时步变化图

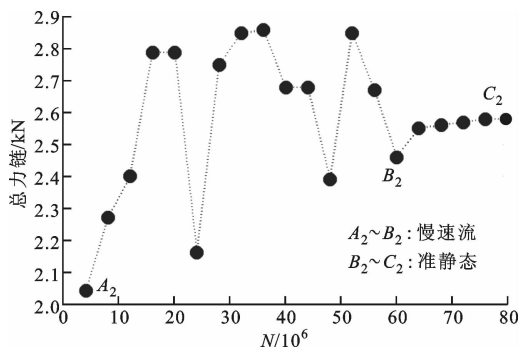


图9 $u=4.5$ m/s时总力链随时步变化图

在快速流状态下,颗粒润滑介质间的碰撞频繁,总力链的大小急剧下降,且总力链大小随时步波动的波峰和波谷间的差值较小。快速流状态下,虽然颗粒润滑介质间的碰撞对颗粒润滑介质流动的影响较大,但是颗粒润滑介质间形成的无数瞬态力链对颗粒润滑介质的流动起到了很重要的影响作用。

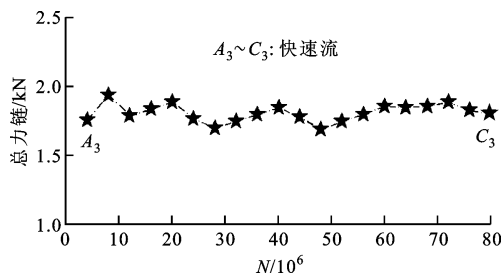


图10 $u=15$ m/s时总力链随时步变化图

3.3 力链分布特点及影响

为了进一步研究力链对颗粒润滑介质流动的影响,根据法向接触力的大小把力链分成弱力链、强力链和超强力链3种类型,具体定义为: $0 \leq f_1 \leq \frac{1}{2} f_{1\max}$ 时为弱力链; $\frac{1}{2} f_{1\max} < f_1 \leq \frac{2}{3} f_{1\max}$ 时为强力链; $\frac{2}{3} f_{1\max} < f_1 \leq f_{1\max}$ 时为超强力链。根据力链类型,分别分析了准静态流、慢速流和快速流状态下弱力链、强力链和超强力链的变化规律。

弱力链、强力链和超强力链在准静态流、慢速流

和快速流状态下的概率分布规律如图 11~13 所示。由图 11~13 可知,在准静态流、慢速流和快速流 3 种动力学状态下,弱力链占总力链的 57%~77%,强力链占总力链的 18.7%~29.8%,而超强力链仅占总力链的 4.3%~13.2%,表明了颗粒润滑介质间通过相互接触形成的力链网络中,超强力链的分布最为稀疏,强力链次之,而弱力链的分布最密集。颗粒润滑介质的动力学状态转变中,弱力链的数目明显减少,而强力链和超强力链的数目则显著增加。在转变过程中,颗粒润滑介质的流动速度明显变小,这表明少数的超强力链和强力链阻碍了颗粒润滑介质的流动,而弱力链则对强力链网络起支撑作用。

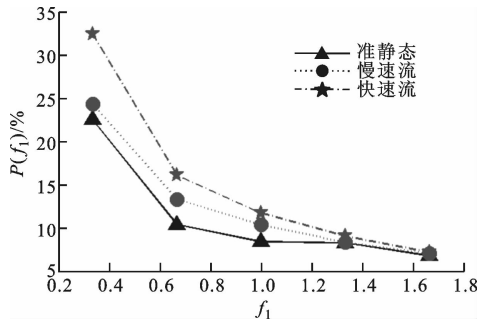


图 11 弱力链的概率分布

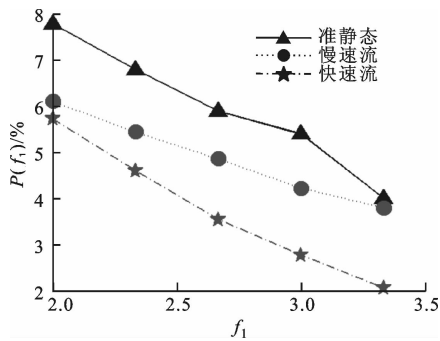


图 12 强力链的概率分布

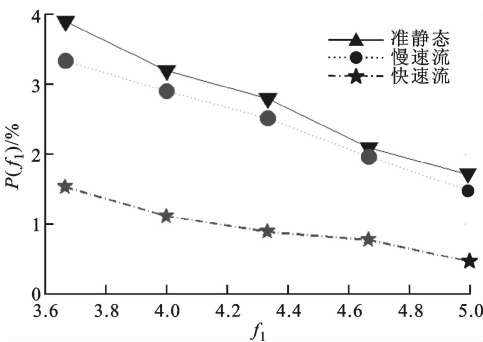


图 13 超强力链的概率分布

4 结 论

为了研究颗粒流润滑状态下的力链演变及动力学状态,基于非连续介质力学的离散单元法理论建

立了剪切平行板间颗粒流润滑的离散元模型,并利用该分析模型研究了颗粒流润滑的接触力分布规律、力链网络的演变规律及动力学状态、力链的分布及对颗粒流润滑系统的影响。

颗粒润滑介质间通过相互接触形成的法向接触力、切向接触力和接触力的概率分布规律服从幂函数规律,且颗粒流润滑系统的承载和动力学特性主要受法向接触力的影响。当下摩擦副的剪切速度逐渐增大时,颗粒润滑介质的动力学状态可以转变为阻塞态、准静态流、慢速流和快速流 4 种状态。总力链的大小在颗粒润滑介质的动力学状态表现为阻塞态、准静态流和慢速流时较大,而在表现为快速流状态时则变得较小。在颗粒润滑介质的动力学状态从快速流转变为慢速流和准静态流时,弱力链的数目明显减少,超强力链和强力链的数目明显增加,与此同时,颗粒润滑介质的流动速度和力链解构和重构的速度则明显减小。

参考文献:

[1] 孙其诚,王光谦. 颗粒物质力学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-17.

[2] 王伟,刘小君,焦明华,等. 颗粒运动和形位参数对颗粒流润滑特性的影响规律 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 101-107.

WANG Wei, LIU Xiaojun, JIAO Minghua, et al. Influences of several slider's parameters on particles flow lubrication characteristics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7): 101-107.

[3] TIMMA K, MYANT C, SPIKS H A, et al. Particulate lubricants in cosmetic applications [J]. Tribology International, 2011, 44(12): 1695-1703.

[4] IORDANOFF I, BERTHIER Y, DESCARTES S, et al. A review of recent approaches for modeling solid third bodies [J]. Journal of Tribology, 2002, 124(10): 725-735.

[5] HESHMA H. The rheology and hydrodynamics of dry powder lubrication [J]. Tribology Transactions, 1991, 34(3): 433-439.

[6] 王伟,孔俊超,顾伟,等. 温成形摩擦界面粉末润滑层宏微观特性的试验研究 [J]. 摩擦学学报, 2016, 36(2): 233-239.

WANG Wei, KONG Junchao, GU Wei, et al. Experimental study on macro and micro characteristics of powder lubricant layer in frictional warm interface [J]. Tribology, 2016, 36(2): 233-239.

(下转第 158 页)