第18卷 第2期 2018年1月
1671—1815(2018)002-0086-07

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18 No. 2 Jan. 2018

引用格式:关成尧, 杜成旺, 刘广虎, 等. 异质材料凸起切向变形动摩擦研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 86—92

Guan Chengyao, Du Chengwang, Liu Guanghu, et al. Dynamic tribology of heterogeneous materials based on asperities tangential deformation [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 86—92

机械、仪表工业

异质材料凸起切向变形动摩擦研究

关成尧[1] 杜成旺[2] 刘广虎[1] 白相东[1] 张 艳[1] 袁四化[1]

(防灾科技学院地震科学系[1], 三河 065201; 北京京桥热电有限责任公司[2],北京 100067)

摘 要 基于三角形凸起假设,提出截止研合角、截止位形角等概念,建立不同材料弹性模量下的凸起切向变形摩擦模型。讨论等倾角异质材料弹性模量、凸起变形、摩擦因数三者之间的理论联系。认为坚硬材料副三角形变形符合 $n/(n+2)$ 原理,软材料副三角形变形符合 $1/(2n+1)$ 原理。异质材料的情况,摩擦因数的“决定因子”主要由坚硬副来决定。弹性模量不同的同粗糙度的两个材料,摩擦因数一般倾向于比同材料的大,摩擦因数倾向于由高刚度材料决定。凸起在长期变形下形成左右不对称的三角形,接触面逐渐平缓,倾角逐渐变小,摩擦因数逐渐变小。这就是三角形凸起的跑合后的摩擦因数变小的重要原因。提出放大系数、细观摩擦因数等概念、计算了理论动静比(理论的动摩擦因数和静摩擦因数之比值)、放大系数和凸起倾角、n、细观摩擦角几者之间的关系。经实例计算分析,材料的动摩擦因数随着凸起倾角和细观摩擦角的增加而增加,细观摩擦角减小,放大系数也明显减小,静摩擦因数大约为动摩擦因数的1.4~1.5者居多,也许导致静摩擦因数存在巨大差异的原因。

关键词 弹性模量 切向变形 截止位形角 截止研合角 摩擦因数 细观摩擦角

中图法分类号 TH117.1; **文献标志码** A

传统的摩擦因数定义为 $\tan\psi$。$\tan\psi$ 只由假定斜面角度决定,和斜面本身的微观摩擦因数无关。经典的摩擦学[1—3]往往和接触力学[3—6]相联系,Greenwood 和 Williamson 的随机表面模型可谓是接触力学和摩擦学结合的典范[7],但是这种随机模型也不能提供很容易理解的摩擦因数成因。砂岩是颗粒堆积体胶结的产物,砂粒作为河流搬运碰撞沉积的产物,其表面已经相对较为光滑,根据一些研究成果,其真摩擦角往往只有5°,如石英、长石、方解石在空气干燥的真摩擦角分别是7.4°、6.8°、8°[8],相当于摩擦因数0.1~0.14之间;而大多数岩石的最小摩擦因数为0.6。一些粗糙岩石面经常为1.0~2.0,并且出现了4.7的摩擦因数[9]。是什么因素导致晶体摩擦因数和宏观材料摩擦因数之间相差一个数量级以上的差异呢? 文献[10]引入三角形截面讨论凸起的摩擦问题,文献[11]认为岩石的摩擦因数分三个层次。以砂岩为例,分为砂粒球形面的表面摩擦因数 μ_{fg}、微裂纹平面摩擦因数 μ_{fs}、凸凹构成的裂缝摩擦因数 μ_{fc} 三个层次,分别代表三类不同的成因,三个层次摩擦的耦合是岩石摩擦因数的决定因素[11],摩擦与润滑经常和孔隙结构有关[12]。摩擦因数可以通过实验来测得,而摩擦面凸起倾角在实践中比较难以把握。文献[13]的分维数是和摩擦面凸起倾角之间有联系的参数,是从另一个视角研究岩石断裂面的几何构型规律。过去的摩擦和接触力学代表性的著作中[1—3]较少考虑切向变形对接触和摩擦的影响;与此相关的“动态摩擦学”机理也必将不同,这些都是从摩擦面的静态几何状况出发,隐含着假设摩擦过程中不存在凸起的切向变形,文献[14]认为摩擦面的凸起之间存在相互作用和切向变形,切向变形过程影响摩擦因数计算的重要因素,认为摩擦过程中接触凸起的接触微元面和主摩擦面之间的角度是逐渐变小的,据此提出了“摩擦截止角”的概念。通过建立简化的模型,提出凸起斜面倾角 β 和摩擦截止角 θ 之间满足 $\tan\theta=\tan\beta/3$ 的几何关系,建立了摩擦面凸起倾角变形和动摩擦因数之间大致的理论关系。本文旨在建立不同表面凸起倾角和材料弹性模量情况下的切向变形摩擦模型,建立材料弹性模量、凸起变形、动摩擦因数三者之间的理论联系。

2017年6月9日收到 中国地震局教师科研基金(20150103)资助

第一作者简介:关成尧(1976—),男,满族,博士,讲师。研究方向:构造地质和油气盆地。E-mail::gcywww@126.com。

1　等倾角异质材料摩擦变形模型

1.1　弹性模量的近似

笔者曾在文献[14]中应用近似的手段解决了同材料、同凸起倾角材料的摩擦变形问题,然而,很多摩擦发生在不同类型材料之间。对于不同材料,弹性模量往往差别较大,如橡胶、碳纤维的弹性模量很小,铝合金等材料弹性模量中等,而钢铁、岩石等材料弹性模量却可以非常大。材料的刚度和硬度一般是和弹性模量成正比的,弹性模量大的材料不容易变形,弹性模量小的材料则在较小的作用力下就产生较大的变形。文献[14]的“三角变形近似”模型具有较为普遍的适用意义;如果粗糙面符合“三角形凸起”假设[10,11,13],切向变形则以接触面转角的形式存在,那么接触面受压转动角度可以认为和弹性模量近似成反比,即

$$\frac{\varphi_S}{\varphi_R} \approx \frac{E_R}{E_S} = n \tag{1}$$

式(1)中,E_R 为高弹性模量材料(高刚度材料、硬材料)的弹性模量,角标 R 表示刚性的(Rigid);E_S 为低弹性模量材料(软材料)的弹性模量,角标 S 表示软的 Soft;n 为高弹性模量材料和低弹性模量材料之间的弹性模量比,可以简称为“弹模比”;φ_R 为高弹性模量材料的变形对应的角度转动值;φ_S 为低弹性模量材料的变形对应的角度转动值。

事实上,处理这种三角形近似的假设,有两种近似的处理方法,一种变形转角和弹性模量成反比,如式(1)所示,可以称其为“变形转角等比假定”。另一种是三角凸起的峰点(如图 1 中的 B 点)垂直于摩擦面 AC 的变形量和弹性模量成反比,可以称其为变形的“峰点位移等比假定”。

$$\frac{\delta_S}{\delta_R} \approx \frac{E_R}{E_S} = n \tag{2}$$

式(2)中,δ_S 为低弹性模量摩擦副三角凸起的峰点垂直于摩擦面 AC 的变形量;δ_R 为高弹性模量摩擦副三角凸起的峰点垂直于摩擦面 AC 的变形量,如图 1 所示。

在凸起倾角 β 和变形转角 φ 均比较小的情况下,这两种近似处理可以看作是等效的,同时处理的结果也可以看作是可以通用和互换的。

1.2　变形原理

根据图 1 中三角形的变形关系,由 $\tan\beta = \dfrac{BO}{AO}$,$\tan\theta = \dfrac{B'O'}{AO'}$,则

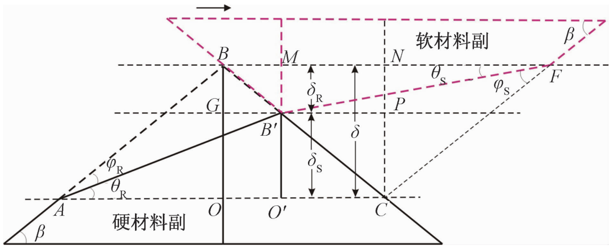

图 1　隐含的三角变形假设和软硬材料副的最大变形原理

Fig. 1　The implicit triangle deformation assumption and Max deformation of soft and rigid material

$$\frac{\tan\theta}{\tan\beta} = \frac{B'O'}{AO'}\bigg/\frac{BO}{AO} = \frac{B'O'}{BO}\bigg/\frac{AO'}{AO} \tag{3}$$

文献[14]中的摩擦截止角可以理解为摩擦变形过程中变形达到最大而面临凸起接触峰点开始脱离而停止局部摩擦的剩余凸起斜面的倾角,对于坚硬(rigid)副,文献[14]提出了摩擦截止角(repose angle)的概念;并提出了相同材料的摩擦变形关系。文献[14]提出了同质材料的变形的“1/3”原理,本文将其推广到异质材料。

由于式(1)和式(2)的关系,本文采用峰点位移等比假定进行处理,在图 1 中,由于 $\delta_S/\delta_R = n$,根据相似三角形对应边的比例关系,可推出下述重要关系式:

$$\frac{\tan\theta_{Re-R}}{\tan\beta} = \frac{B'O'}{AO'}\bigg/\frac{BO}{AO} = \frac{n}{n+1}\bigg/\frac{n+2}{n+1} = \frac{n}{n+2} \tag{4}$$

软(Soft)材料副的规律则明显不同,软材料副摩擦截止位形角 θ_{Re-S} 的正切和原始凸起倾角的正切之间比例关系为如图 1 所示,同理可推出下述重要关系式:

$$\frac{\tan\theta_{Re-S}}{\tan\beta} = \frac{B'M}{CN}\bigg/\frac{FM}{NF} = \frac{1}{n+1}\bigg/\frac{2n+1}{n+1} = \frac{1}{2n+1} \tag{5}$$

在 $n = 1$ 时,无论是 $\dfrac{n}{n+2}$ 还是 $\dfrac{1}{2n+1}$ 都等于 1/3,即都满足文献[14]的 1/3 原理,也就是 $\tan\theta = \tan\beta/3$。可见,文献[14]的摩擦截止角的正切和原始凸起倾角的正切之间比例关系 1/3 原理是两个等倾角等弹性模量的摩擦副摩擦的规律,对于非等倾角的凸起或者两个摩擦副材料不同,那么两个摩擦副的凸起变形能力是不同的。1/3 原理是式(4)和式(5)的一个特例,适用于同材料并且表面粗糙状况相同的两个摩擦副之间的摩擦。对于异质材料,并且表面粗糙状况不同的摩擦,则需要建立有更广泛适用的切向变形关系为主体的动态摩擦理论。式(4)和式(5)的处理模式隐含了应用式(2)的处理,即隐含符合“峰点位移等比假定”。

1.3 研合线模型

这里可以发现,弹性变形能力(刚度)不同两个摩擦副的摩擦截止角并不是平行的直线,而是呈一定的交角。可以将两个凸起的峰点重合时刻作为摩擦行为结束的点,这个时刻称为摩擦截止时刻,那么,摩擦截止时刻就是在摩擦未到达脱离前的最后一刻。在到达摩擦截止时刻之前,一直存在一个真实的研合接触面,如图 2 中的 $E'B'$线就是瞬时研合面,图中体现为投影线。瞬时研合线 $E'B'$的倾角就为“瞬时研合角”,和 AE'和 FB'的倾角均不同,倾角会介于 AE'和 FB'两者之间。

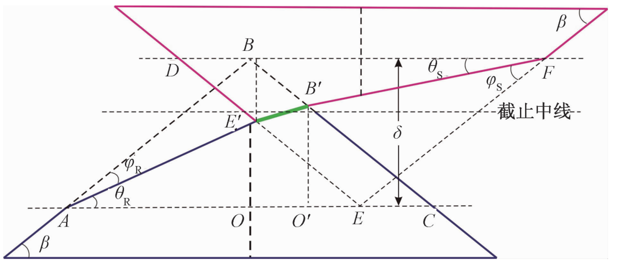

图 2 摩擦过程中的瞬时位形线和瞬时研合线

Fig. 2 The instantaneous shaped lines and instantaneous occlusal line during friction

可以近似地认为 AE'是摩擦过程中的摩擦位形线,表示摩擦过程中脱离瞬时研合面之后仍在瞬时研合面的挤压变形“拖动”下角度继续转动瞬时位形线,这种不在瞬时研合面 $E'B'$之上的瞬时线可以叫做瞬时位形线、瞬时位形线与主摩擦面(平行于 AC)之间的夹角为瞬时位形角,在图中两个摩擦副中分别用 θ_R 和 θ_S 来表示。在两个凸起的峰点重合时刻(摩擦截止时刻)对应的瞬时位形线就是截止位形线,截止位形线对应的凸起倾角本文称其为截止位形角,而瞬时研合面逐渐转动,到摩擦截止时刻转化为点接触,在此时的接触可以看作瞬时研合面转动的截止面,这个面的倾角可以称为截止研合角,代表着摩擦过程中遇到的最小的阻碍活动的凸起倾角,对应着瞬时摩擦因数的最小值。那么本文将文献[14]中的摩擦截止角分成了两个概念,一个是脱离瞬时研合面之后形成的截止位形角,另一个是截止研合角。摩擦截止时刻(两个凸起的峰点重合时刻)的重合峰点对应的水平线为“截止中线”,文献[14]中的截止中线就在半切入深度处。

瞬时研合线 $E'B'$是一个保证两个摩擦副相互研合一致的面,那么,这两个相对小的接触面如何妥协一致呢?本文近似地认为在瞬时研合线 $E'B'$面上局部产生“二次弹性变形”,而这个高应力接触部分在位移滑开后还会回弹到“瞬时位形线”上,那么,可以认为二次弹性变形仍然符合转角和弹模比 n 的线性比例关系,也就是仍然符合式(1)。

那么,截止研合角 ψ_{eq}(等凸起倾角情况Equal)符合式(6):

$$\psi_{eq} = \theta_{Re-S} + \frac{n}{n+1}(\theta_{Re-R} - \theta_{Re-S}) = \theta_{Re-R} - \frac{1}{n+1}(\theta_{Re-R} - \theta_{Re-S}) \tag{6}$$

由式(4)和式(5)可以获得 θ_{Re-R} 和 θ_{Re-S},将 θ_{Re-R} 和 θ_{Re-S} 代入式(6)得 ψ,进而计算 ψ 还是很容易的。决定摩擦过程中的瞬时摩擦因数的应该是瞬时研合角 ψ,而不是瞬时位形角,那么,瞬时研合角的变化过程则是从 β 逐渐降低到截止研合角 ψ_{eq} 的过程,截止研合角是一个略大于截止位形角的角度。因此,应用 $\tan\beta$ 和“截止位形角”$\tan\theta_{Re}$ 的加和平均一般会比实际值略偏大。

如果近似地认为整个变形过程中都是按照 n 倍率变形,瞬时研合角 ψ 的计算可以近似地推广到:

$$\psi = \theta_S + \frac{n}{n+1}(\theta_R - \theta_S) = \theta_R - \frac{1}{n+1}(\theta_R - \theta_S) \tag{7}$$

1.4 摩擦因数模型

由于凸起的“阻拦作用”产生的摩擦为一个渐变的过程,那么,单一凸起摩擦因数是一个动态变化的过程,是一个凸起倾角由 β 逐渐变为为截止研合角 ψ_{eq} 的过程。由参考文献[11]获得摩擦因数计算公式:

$$\mu_{fc} = \frac{\mu_{fs} + \tan\psi}{1 - \tan\psi\mu_{fs}} = \tan(\psi + \omega) \tag{8}$$

等凸起倾角情况的摩擦因数可以加和平均取为

$$\overline{\mu_{fc}} = \frac{\tan(\psi_{eq} + \omega) + \tan(\beta + \omega)}{2} \tag{9}$$

式中,$\tan\omega$ 为纯平面的摩擦因数,就是后文中引入的细观摩擦因数(考虑凸凹接触表面的摩擦因数则可称为“宏观摩擦因数”),细观摩擦因数相当于文献[11]中的微裂纹平面摩擦因数 μ_{fs}。依据式(8)、式(9)的模型可以获得精确的摩擦因数计算结果。

1.5 等角模型探讨

对于同倾角但是不同材料的情况,$\tan\theta = \tan\beta/3$ 的几何关系已经不再严格成立,瞬时位形角和瞬时研合角也发生分离,截止研合角 ψ_{eq} 和初始凸起倾角 β 之间的关系和材料弹性模量有关,坚硬副截止位形角的正切和原始凸起倾角的正切之间比例关系符合 $n/(n+2)$ 变形原理,而软材料副的截止位形角的正切和原始凸起倾角的正切之间比例关系符合 $1/(2n+1)$ 变形原理,截止研合角 ψ_{eq} 则在基础上进一步耦合,在数值上介于软硬两个摩擦副的截止位

形角之间。对比 $n/(n+2)$ 变形原理和 $1/(2n+1)$ 变形原理,坚硬材料截止位形角和原始凸起倾角之间的差距远比小软材料的小,坚硬材料摩擦变形导致的凸起斜面的转动角度小得多,而软材料摩擦变形导致的凸起斜面的转动角度大得多,可见摩擦因数主要由坚硬的材料决定。硬度不同的同粗糙度的两个材料,摩擦因数一般倾向于比同材料的大。

2　异质材料复合摩擦因数

2.1　复合动摩擦因数正义

文献[11]提出了如果知道抛光摩擦因数和抛光前摩擦因数可以反求凸起平均倾角和分维数,则有可能成为一种简单但可以替代“光弹统计”的摩擦研究方法。那么,如何才能计算出各个部分的摩擦因数呢?已知 a 和 b 两种材料的同材料抛光摩擦因数 μ_{pa}、μ_{pb} 和粗糙摩擦因数 μ_{caa}、μ_{cab},根据文献[11],$\mu_p \approx \mu_{fs}$,$\mu_{ca} \approx \mu_{fc}$。根据式(7)可以反求 $\overline{\tan\theta_a}$ 和 $\overline{\tan\theta_b}$,由于是同材料同弹性模量获取的数据,依据文献[14],$\overline{\tan\theta_a} = \frac{2}{3}\tan\overline{\beta_a}$,$\overline{\tan\theta_b} = \frac{2}{3}\tan\overline{\beta_b}$,则可以获得两种材料的凸起倾角角度均值 $\overline{\beta_a}$ 和 $\overline{\beta_b}$。如果知道两种材料的弹性模量 E_a 和 E_b,可以得到 E_a 和 E_b 之间的弹性模量比 n,则可根据本文的“异倾角－异材料变形模型“计算相关的复合摩擦因数。

2.2　细观摩擦因数

细观摩擦因数是指材料颗粒结合成纯粹平面时的摩擦因数,而微凸起则是加工技术所导致的摩擦因数的放大,因此,细观摩擦因数相当于文献[11]中的 μ_{fs},就是文中凸起斜面的表面摩擦因数 $\tan\omega$,ω 则为胎摩擦角。异质材料的摩擦因数一般大于同质材料摩擦因数是微凸起层面的摩擦因数复合,该部分复合与放大比例符合前文的 $\frac{n}{n+2}$ 变形原理和 $\frac{1}{2n+1}$ 变形原理。需要注意到的是,异质材料细观摩擦因数 μ_{fs} 的复合问题目前还处于空白。

另外,还可以对应引入凸起增强系数 α,可以有对应几个数据含义。

$$\alpha = \frac{\mu_{fc}}{\mu_{fs}} = \frac{\tan(\psi + \omega)}{\tan\omega} \tag{10}$$

$$\overline{\alpha} = \frac{\overline{\mu_{fc}}}{\mu_{fs}} = \frac{\tan(\psi_{eq} + \omega) + \tan(\beta + \omega)}{2\tan\omega} \tag{11}$$

α 为针对单个微凸起为研究对象时的摩擦过程中的真实瞬时摩擦因数的凸起增强系数,而 $\overline{\alpha}$ 是整个摩擦过程中的平均凸起增强系数。引入这两个概念的好处是,细观摩擦因数的改变需要依据纳米摩擦学理论来改善其颗粒(胶束、晶簇等)的空间状态来实现,是一般的机械加工所不能控制的,而“凸起增强系数”部分对应的摩擦因数则是宏观的微凸起,是一般的机械加工可以控制的,这部分的摩擦因数降低主要是通过机械加工来实现。对于凸起增强系数的概念,从其意义的角度理解,可以理解为由于宏观的微凸起的摩擦增强作用而产生的摩擦因数的放大,故凸起增强系数可以称为放大系数。

2.3　静摩擦因数的局限理解

对于静摩擦因数,可以理解为摩擦初动时候对应的摩擦因数,在本文的模型中在两个微凸起还没有相遇而逐渐走向相遇时的摩擦因数,本文称两个摩擦副上对应的两个微凸起刚刚接触而尚未发生弹性形变的点为初动点。初动点对应的附加阻挡效应和 $\tan\beta$ 成正比,而摩擦因数则为 $\tan(\beta+\omega)$,初动点对应的摩擦因数为初动点摩擦因数,可以简称为初动摩擦因数,下同。这是一个微凸起所能够提供的最大摩擦因数。这里讨论初动点摩擦因数主要是想建立其与静摩擦因数之间的联系,本文认为由于摩擦初动会导致原本没有接触的微凸起逐渐走向接触,并提供相对大于动摩擦因数的摩擦因数,由于静摩擦因数测定时,并非所有的点都同时,因此,必然有整体的初动摩擦因数小于单个微凸起的初动点摩擦因数,本文倾向于认为

$$\mu_{Ini} = \tan(\beta + \omega) > \mu_{St} \tag{12}$$

式(12)中 μ_{Ini} 为单个微凸起的初动点摩擦因数;μ_{St} 为静摩擦因数。静摩擦因数 μ_{St} 必为介于 μ_{Ini} 和动摩擦因数 μ_{fc} 之间的某一个数字;并且离 μ_{Ini} 会比较接近,目前并没有静摩擦因数和“初动点摩擦因数”之间联系的文献;并且,这种联系的概率统计模型也超出了本文的能力范畴。为了理解问题的方便,本文权且认为一般:

$$\mu_{Ini} \approx \mu_{St} \tag{13}$$

那么,就可以粗略地用“初动点摩擦因数”μ_{Ini} 代替静摩擦因数 μ_{St},这对于后文中的实例计算较有裨益。定义一个概念“初动摩擦因数比”$\lambda_{Ini/D} = \frac{\mu_{fc}}{\mu_{Ini}}$,简称为初动比,同时定义一个 $\lambda_{St/D} = \frac{\mu_{fc}}{\mu_{St}}$ 为动静比摩擦因数,简称为动静比。

如果初动点摩擦因数 μ_{Ini} 和静摩擦因数 μ_{St} 之间存在线性关系:

$$\mu_{Ini} = \eta\mu_{St} \tag{14}$$

则可以近似认为

$$\lambda_{Ini/D} = \lambda_{St/D}/\eta \tag{15}$$

对于之间的系数 η 可以称为“初动/静摩擦

比”,需要理论界进行深入研究,由于静摩擦因数的成因还缺乏深入的研究,本文暂定 $\eta \approx 1$ 。

3　应用实例分析与讨论

从前述分析中可见,弹性模量不同导致的动摩擦因数和动静比不同,笔者选用不同的参数进行敏感性分析计算,计算结果如图 3 ~ 图 8 所示。

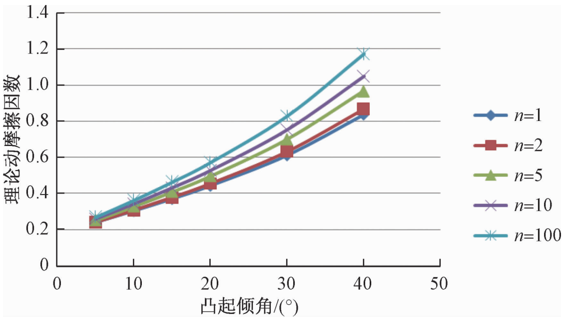

图 3　动摩擦因数和凸起倾角、n 之间关系图(细观摩擦角 10°)

Fig. 3　Relationship between dynamic friction coefficient and asperities original inclination angle, n (mesoscopic friction angle 10°)

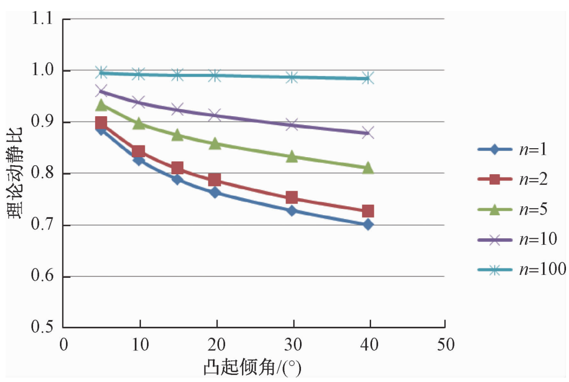

图 4　理论动静摩擦因数比 $\lambda_{S/D}$ 和凸起倾角、n 之间关系图(细观摩擦角 10°)

Fig. 4　Relationship between the ratio of dynamic/static friction coefficient $\lambda_{S/D}$ and asperities original inclination angle, n (mesoscopic friction angle 10°)

从图 3 ~ 图 8 可见,动摩擦因数随着凸起倾角和细观摩擦角的增加而增加,这和理论阐述是一致的。而理论摩擦动静比的数值则整体可能存在一个最大值,理论动静比越小的材料,选择同材料的减小阻力的意义越大。理论摩擦动静比在 0.4 ~ 0.85 之间,平均在 0.6 ~ 0.7 之间,那么,静摩擦因数为动摩擦因数的 1.4 ~ 1.5 倍者居多,这或者就是导致静摩擦因数差异的主要原因。理论摩擦动静比随着凸起倾角的加大而减小,随着 n 的增加而增大。理论动静比基本能够反映材料摩擦角和截止摩擦角之间的存在差异,同时反映出摩擦因数和初动点的理论摩擦系数之间的差异。

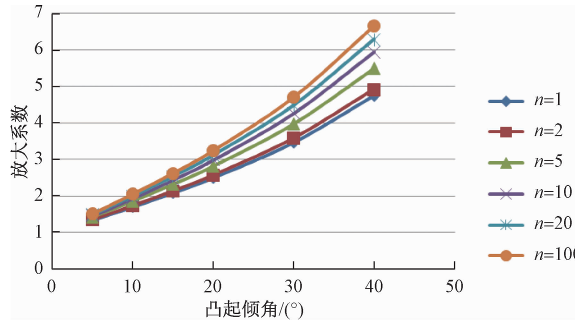

图 5　放大系数和凸起倾角、n 之间关系图(细观摩擦角 10°)

Fig. 5　Relationship between the amplification ratio and asperities original inclination angle, n (mesoscopic friction angle 10°)

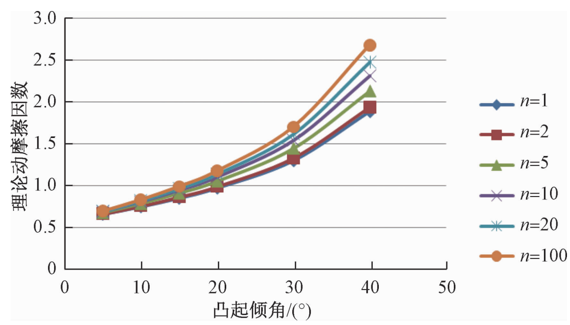

图 6　动摩擦因数和凸起倾角、n 之间关系图(细观摩擦角 30°)

Fig. 6　Relationship between the dynamic friction coefficient and asperities original inclination angle, n (mesoscopic friction angle 30°)

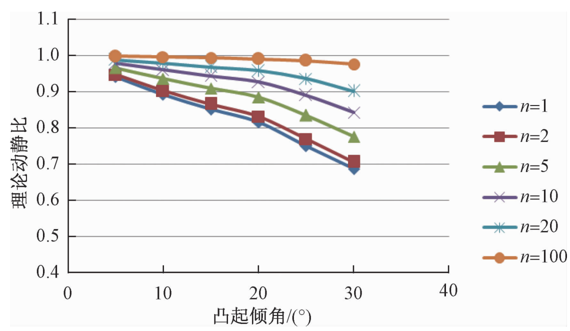

图 7　动静比和凸起倾角、n 之间关系图(细观摩擦角 30°)

Fig. 7　Relationship between the Ratio of dynamic/static friction coefficient $\lambda_{S/D}$ and asperities original inclination angle, n (mesoscopic friction angle 30°)

对比以上图可见,随着细观摩擦角减小,放大系数也明显减小,说明减小细观摩擦角不仅可以减小宏观摩擦因数,同时也可以减小放大系数,这种宏观放大效应导致了摩擦学实验数据的离散。放大系数 α 是对突起倾角非常敏感的参数;而 n 的增大往往起到加大放大效应的宏观作用。“细观摩擦角”体现的是材料内部微观结构的整体状况,而放大系数部分受控于材料表面加工的技术,如机械加工的精确度及数控机床的使用等。

前文所说石英、长石、方解石在空气干燥的真摩

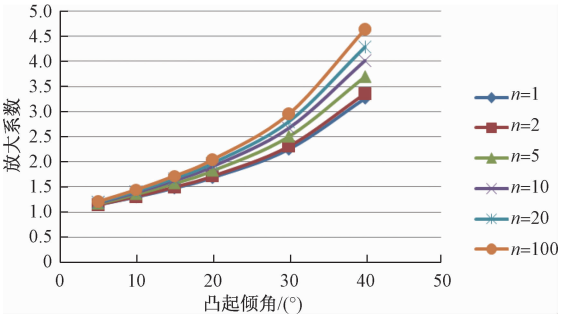

图 8　放大系数和凸起倾角、n 之间关系图(细观摩擦角 30°)

Fig. 8　Relationship between the amplification ratio and asperities original inclination angle, n(mesoscopic friction angle 30°)

擦角分别是 7.4、6.8、8°[8],相当于摩擦因数 0.1 ~ 0.14 之间,而大多数岩石的最小摩擦因数为 0.6,一些粗糙岩石面也经常为 1.0 ~ 2.0,并且出现了 4.7 的摩擦因数[9]。这个相差一个数量级左右的差异和本文实例中的巨大放大系数是一致的。

4　分析与讨论

本文可以总结几个有益的推论:①异质材料在细观摩擦因数相差不大的情况下,异质材料的摩擦因数一般大于同质材料摩擦因数;②多相合金的摩擦因数一般大于单相材料的摩擦因数,合金金相结构的改善可以成为减小摩擦因数的力量;③摩擦因数和增强系数 α 主要由坚硬副来决定,坚硬副变形难度大,更加容易保留接近变形前的高凸起倾角形态,这种"阻挡"作用强于同种材料之间的摩擦,摩擦因数和增强系数 α 主要由坚硬副和软弱材料之间的比值 n 来决定。

材料摩擦行为理解为细观摩擦因素和凸起摩擦因素两部分, 细观摩擦因素是材料微观的固有的摩擦品性,主要受材料的颗粒组构来决定,如金属的金相颗粒、岩石的矿物晶体颗粒、陶瓷的黏土颗粒、沙土聚合体的沙土颗粒等,纳米材料的研究是改变细观摩擦因素的重要理论途径。增强系数 α 是宏观的材料表面机械形貌属性,如机械加工,破裂面形成后来的摩擦面等,可以简称这种宏观的摩擦形貌为宏观摩擦因素。这样,材料的摩擦因数就有细观摩擦因素和宏观摩擦因素两个方面的影响因素,这两个方面影响因素的复合是材料摩擦因数具体数值的决定因素,只是有的材料宏观摩擦因素起的作用很大,放大系数很大,有的材料细观摩擦因数也会比较大,应用纳米技术研究材料的属性的意义在于此,而有的材料则两方面影响均比较大。在长期变形的作用下,凸起的截面会产生变形,这种长期变形是不可逆的,那么,三角形凸起在长期变形下形成左右不对称的三角形,接触面逐渐平缓,凸起倾角逐渐变小,摩擦因数逐渐变小,这就是三角形凸起的跑合后的摩擦因数变小的重要原因。材料跑合的过程就是放大系数逐渐变小,而摩擦因数逐渐接近材料胎(体)摩擦因数的过程,跑合的结果就是接近抛光摩擦因数的行为。

本文将静摩擦因数和动摩擦因数平均区别开来对待,并认为变形过程的平均是动摩擦因数,而变形的出发点为静摩擦因数,静摩擦因数则为本文的"初动点摩擦"到动摩擦之间的某一个数值。本文建立的模型旨在说明凸起倾角和动摩擦角之间的理论关系,而不是变形的数值计算,这个基本关系适合大多数类型的材料,其在摩擦学方面的应用将是广泛的。

5　结论

(1)本文建立不同材料间及不同表面凸起倾角情况下的材料弹性模量、凸起变形、摩擦因数三者之间的理论关系模型,摩擦因数倾向于由硬材料弹性模量和陡凸起共同决定。本文将接触前的坡度、波度、粗糙度等形貌统计和接触变形的动态过程区别开来,这是一个明显的进步。

(2)弹性模量不同的两个摩擦副,坚硬材料副三角形变形符合 $n/(n+2)$ 原理,软材料副三角形变形符合 $1/(2n+1)$ 原理,而摩擦因数近似地受这些变形因素制约。

(3)弹性模量不同的两个材料之间摩擦,摩擦因数一般倾向于比同材料间摩擦的摩擦因数的大。

(4)动摩擦因数随着凸起倾角和细观摩擦角的增加而增加,细观摩擦角减小,放大系数也明显减小,减小细观摩擦角不仅可以减小宏观摩擦因数,同时也可以减小放大系数。

(5)研究抛光摩擦因数很有必要,应用材料抛光摩擦因数和粗糙摩擦因数之间的差异,可以计算不同材料摩擦耦合的理论摩擦因数。

(6)理论摩擦动静比在 0.4 ~ 0.85 之间,平均在 0.6 ~ 0.7 之间,静摩擦因数大约为动摩擦因数的 1.4 ~ 1.5 者居多,这就是导致静摩擦因数存在巨大差异的原因。

参　考　文　献

1　温诗铸,黄　平. 摩擦学原理. 2 版. 北京:清华大学出版社,2002
Wen Shizhu, Huang Ping. Tribology principle, 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2002

2　Halling J. Principles of tribology. London:Mcmillan Press Ltd,1975

3　瓦伦丁,波波夫. 接触力学与摩擦学的原理与应用. 李　强,雒建斌,译. 北京:清华大学出版社,2011
Valentin, Popov. Contanct mechanics and friction physical principles and applications. Li Qiang, Luo Jianbin, Translated. Beijing:Tsinghua University Press,2011

4 孙其诚,王光谦. 颗粒物质力学导论. 北京:科学出版社,2010
Sun Qicheng, Wang Guangqian. Introduction to the physical and mechanical of granular materials. Beijing: Science Press,2010

5 Johnson K L. Contact mechanics. London: Cambridge University Press,1985

6 Oda M,Iwashita K. Mechanics of granular materials, an introduction. Boca Raton:CRC Press,1999

7 Greenwood J A, Williamson J B. Contact of nominally flat surface. Proc Roy Soc A,1966,295: 300—319

8 孙其诚,厚美瑛,金 峰. 颗粒物质物理与力学. 北京:科学出版社,2011
Sun Qicheng, Hou Meiying, Jin Feng. *et al.* The physical and mechanical of granular materials. Beijing: Science Press, 2011

9 安 欧. 构造应力场. 北京:地震出版社,1992
An Ou, Tectonic stress field. Beijing: Earthquake Publishing House, 1992

10 关成尧,漆家福,邱楠生,等. 应力比影响下的压剪裂纹破裂角、闭锁角、摩擦因数及其耦合关系——基于损伤力学与裂纹方向分布概率的岩石(裂缝)宏观参数. 岩土力学, 2012;33(12): 3570—3576
Guan Chengyao, Qi Jiafu, Qiu Nansheng, *et al.* Crack angle, lock angle, friction coefficient under stress ratio affected and its coupling relationship in a compression-shear crack-macroscopic rock mechanics parameters based on microscopic damage and probability distribution of crack direction. Rock and Soil Mechanics, 2012;33(12): 3570—3576

11 关成尧,漆家福,邱楠生,等. 裂纹面摩擦因素的层次及影响因素研究——以砂岩(颗粒胶结体)为例. 应用数学和力学,2013; 34(2):209—216
Guan Chengyao, Qi Jiafu, Qiu Nansheng, *et al.* The three levels coefficient friction of sandstone cracks and its influencing factors. Applied Mathematics and Mechanics,2013; 34(2):209—216

12 张国涛,尹延国,李吉宁,等. 计入孔隙结构影响的复层含油轴承润滑特性分析. 应用数学和力学,2016; 37(8):873—879
Zhang Guotao, Yin Yanguo, Li Jining, *et al.* Effects of pore structure on hydrodynamic lubrication of muiti-layer oil bearings. Applied Mathematics and Mechanics, 2016; 37(8):873—879

13 谢和平,陈忠辉. 岩石力学. 北京:科学出版社,2004
Xie Heping, Chen Zhonghui. Rock mechanics. Beijing: Science Press,2004

14 Guan C Y, Qi J F, Qiu N S, *et al.* The relationship between the friction coefficient and the asperities original inclination Angle. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology,2013;6(11):1906—1910

Dynamic Tribology of Heterogeneous Materials Based on Asperities Tangential Deformation

GUAN Cheng-yao[1], DU Cheng-wang[2], LIU Guang-hu[1], BAI Xiang-dong[1], ZHANG Yan[1], YUAN Si-hua[1]

(Institute of Disaster Prevention Science and Technology[1], Sanhe 065201, China; Beijing Jingqiao Thermal Power Co., Ltd.[2], Beijing 100067, China)

[**Abstract**] Based on the triangular asperities hypothesis, repose shaped angle, repose angle of lapping surface and so on, were proposed to create some deform friction models of different surface inclination and different modulus of elasticity of those materials. It is discussed respectively the relationship of material elastic modulus, asperities deformation, and friction coefficient. And the deformation of those hard materials is considered to be in conformity with the $n/(n+2)$ principle and the deformation of those soft materials in conformity with the $1/(2n+1)$ principle. In consideration of different materials, the determining factor of friction coefficient is mainly determined by the high elasticity. The friction coefficient between two materials with different elastic modulus tends to be larger than that between the same materials generally. Friction coefficient tends to be determined by stiffness and steep asperities. The asperities becomes smoother on long asymmetrical deformation and inclination angle becomes smaller and the friction coefficient becomes larger. This is an important reason that the friction coefficient of a triangular asperities becomes smaller after running. The theoretical ratio of dynamic/static friction coefficient, the amplification ratio and the asperities original inclination, n and so on, were calculated. The dynamic/static friction coefficient is always increased with the increase of the Asperities original inclination angle and the mesoscopic friction angle. The amplification ratio will decreases obviously with the decreases of the mesoscopic friction angle also. The friction angle of the tire can be reduced not only by the friction angle of the tire, but also by the friction angle. The static friction coefficient which always of about 1.4 ~ 1.5 times the dynamic friction coefficient were the majority, that should be the reasons why the static friction coefficient be caused a huge difference.

[**Key words**] elastic modulus tangential deformation repose shaped angle repose angle of lapping surface dynamic friction mesoscopic friction angle