

数值模拟填料含量对 Cu/PTFE 复合材料摩擦性能的影响

解挺*, 杨华平, 江凯

(合肥工业大学 摩擦学研究所, 合肥 230009)

摘要: 为了探讨填料含量对 Cu/聚四氟乙烯(PTFE)复合材料摩擦磨损的影响, 运用二维颗粒程序(PFC2D)对 PTFE 基复合材料在不同含量的 Cu 颗粒填充条件下与 45# 钢的摩擦磨损过程进行数值模拟分析, 主要研究了 Cu/PTFE 复合材料的摩擦转移及磨损问题。模拟结果表明: Cu/PTFE 复合材料与 45# 钢组成摩擦副时, 会在 45# 钢表面形成一层转移颗粒层, 转移颗粒层的形成能够有效地降低 PTFE 基复合材料的磨损。Cu 颗粒的添加一方面可以通过自身转移的“钉扎”作用促进转移颗粒层的形成, 另一方面由于提高了复合材料的整体强度, 又对转移颗粒层的形成产生了一定的抑制作用。所以添加适量的 Cu 有利于转移颗粒层的形成, 但 Cu 含量过高时其作用又会降低。Cu 颗粒的加入降低了 PTFE 基复合材料的磨损量, 且随着 Cu 含量的增加减磨效果增强。在 Cu 颗粒的质量分数为 50% 时, PTFE 基复合材料的磨损颗粒数较纯 PTFE 的减少了近一半。

关键词: 复合材料; 填料; 数值模拟; 磨损; 转移

中图分类号: TB333; TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2015)01-0039-08

聚四氟乙烯(PTFE)基复合材料具有优异的减摩耐磨特性, 因而作为摩擦副部件被广泛应用于机械、汽车、仪表及航空航天等领域。在 PTFE 中加入不同的填料, 可以显著提高其机械强度、硬度及耐磨性。近年来, 国内外学者不断探究填料种类及含量对 PTFE 摩擦磨损的影响^[1-6], 对填料在 PTFE 中的作用机制进行了分析与讨论, 为材料的结构和性能优化提供了很好的基础。但由于实验条件及观察方法等的限制, 很难了解填料在摩擦界面的动态演变过程及其对转移膜形成的影响, 而这是实现摩擦性能调控的关键问题。关于填料对转移膜形成过程的影响至今一直是研究的热点也是难点, 实验方法难以满足其动态过程的研究要求, 数值模拟提供了一个可行的研究途径。

随着计算机技术的发展, 数值模拟已成为研究各种动态过程的重要工具^[7-8]。特别是对于实验研究中一些难以观察的时变特性研究, 数值模拟已成为重要的研究手段。摩擦系统是一个典型的时变系

统, 对于摩擦系统界面特性演变的数值模拟研究也已成为当前摩擦学研究的热点。Schargott 等^[9]利用移动元胞自动机法(Movable Cellular Automata Method)对轮轨接触的表面形貌发展问题进行了数值模拟, 模拟结果显示在摩擦界面形成了一层影响表面形貌变化的类流层, 且颗粒在垂直方向发生了迁移。刘小君教授研究小组也利用基于离散元开发的 PFC2D 程序模拟研究了摩擦过程表面形貌的动态变化^[10]。但在已有的关于摩擦过程的数值模拟研究中, 主要研究的是磨损行为的演变规律, 而关于摩擦界面迁移行为的研究鲜有报道, 且一般不涉及到复合材料中第二相的加入对基体材料摩擦磨损的影响, 因此采用数值模拟的方法研究第二相的加入对材料摩擦界面迁移规律和磨损规律的影响, 为未来研究填充改性对复合材料摩擦磨损性能的调控提供一定的理论基础和参考。

鉴于离散元对于分析摩擦界面更为适合, 笔者选用基于离散元思想开发的二维颗粒程序^[11-13]

收稿日期: 2014-01-10; **录用日期:** 2014-04-08; **网络出版时间:** 2014-05-21 14:08

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20140521.001.html

基金项目: 国家自然科学基金(51275144)

通讯作者: 解挺, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为复合材料摩擦学。 E-mail: txie@hfut.edu.cn

引用格式: 解挺, 杨华平, 江凯. 数值模拟填料含量对 Cu/PTFE 复合材料摩擦性能的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32(1): 39-46. Xie T, Yang H P, Jiang K. Numerical simulation of influence of filler content on tribological properties of Cu/PTFE composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(1): 39-46.

(PFC2D)对填充改性金属/PTFE 基复合材料摩擦磨损进行了建模和模拟,并从微观层面上再现了金属/PTFE 基复合材料摩擦界面迁移的过程,定量地描述了转移及磨损等问题,探讨其界面转移及磨损的演变规律。

1 数值模拟

1.1 计算过程和基本假设

PFC2D 是通过离散单元法来模拟圆形颗粒介质的运动及相互作用的。PFC2D 程序中力-位移的计算过程如图 1 所示:在每个时步的起始,根据已知的颗粒和墙的最新位置来更新接触的情况,使用力和位移法则更新每个接触力;然后使用运动方程,根据接触力产生的合力和合力矩更新每个颗粒的速度和位置,如此反复下去,直到程序结束。

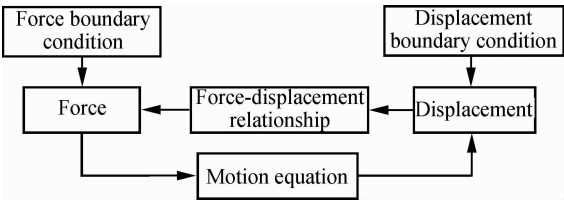


图 1 PFC2D 程序中力-位移的计算过程
Fig. 1 Force-displacement calculation cycle diagram in PFC2D program

模拟过程中做了以下基本假设:(1) 颗粒单元为刚性体;(2) 接触发生在很小的范围内,即点接触;(3) 接触特性为柔性接触,接触处允许有一定的“重叠量”;(4) “重叠量”的大小与接触力有关,与颗粒大小相比“重叠量”很小;(5) 接触处有特殊的连接强度;(6) 颗粒单元为圆盘形(或球形);(7) 不考虑温度效应的影响。

1.2 数值模型的建立

1.2.1 Cu/PTFE 复合材料数值模型的建立

为探讨填料含量对 PTFE 基复合材料摩擦性能的影响,选取金属 Cu 颗粒作为填料,填充到 PTFE 材料中,Cu 的填充质量分数分别为 0、20wt%、30wt%、40wt% 和 50wt%。为更接近实际情况,在模型建立时,将 Cu 颗粒球随机分布到 PTFE 基体中。图 2 为 Cu 填充 PTFE 基复合材料数值模型(绿色颗粒球为 PTFE 材料,黄色颗粒球为 Cu 材料)。可以看出,随着 Cu 颗粒质量分数的增加,Cu 颗粒球的分布越来越密集。

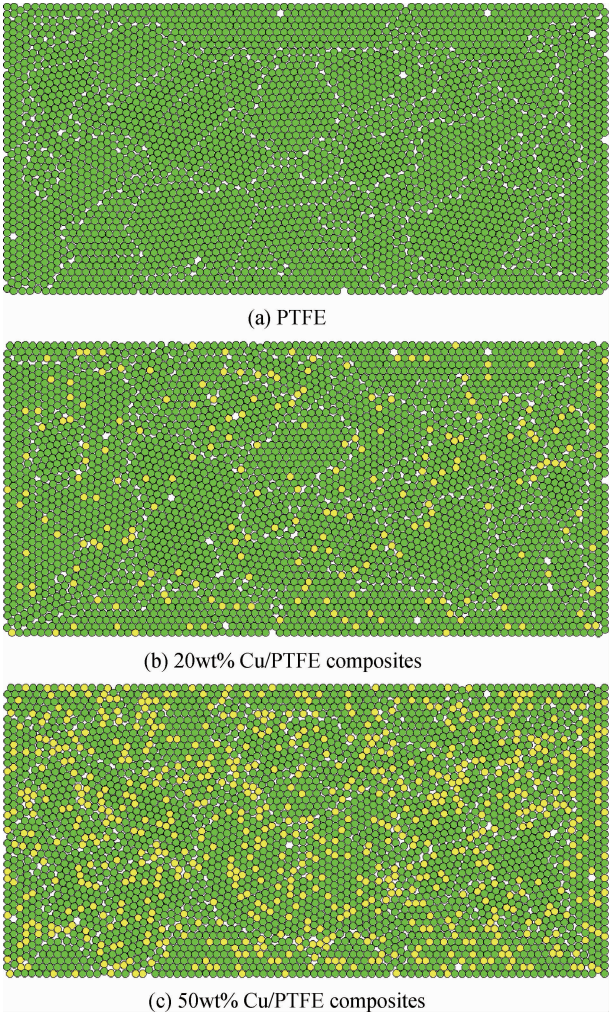


图 2 Cu 填充 PTFE 基复合材料数值模型
Fig. 2 Numerical simulation models of Cu filled PTFE-based composites

1.2.2 摩擦副数值模型与摩擦条件的建立

选用 PTFE 基复合材料与 45# 钢配副建立摩擦副数值模型。摩擦副数值模拟模型如图 3(a)所示。上试样为 PTFE 基复合材料,由半径为 0.15 μm 的 PTFE 与 Cu 颗粒球随机分布组成,尺寸为 25 μm×12 μm;下试样为 45# 钢,由半径为 1.5 μm 的颗粒球按一定规则分布组成,尺寸为 84 μm×12 μm。上试样最上面一层颗粒(图 3(a)中的粉红色球)作为颗粒体边界,对其施加竖直向下的恒定载荷,PTFE 基复合材料的载荷随时步数的变化趋势如图 3(b)所示,载荷大小为 4.5 MPa。对摩时上试样(PTFE 基复合材料)固定不动,下试样(45# 钢)作速度大小为 0.15 m/s 的循环往复运动,45# 钢的速度随时步数的变化趋势如图 3(c)所示。综上所述,摩擦系统为上试样 PTFE 基复合材料相对于下

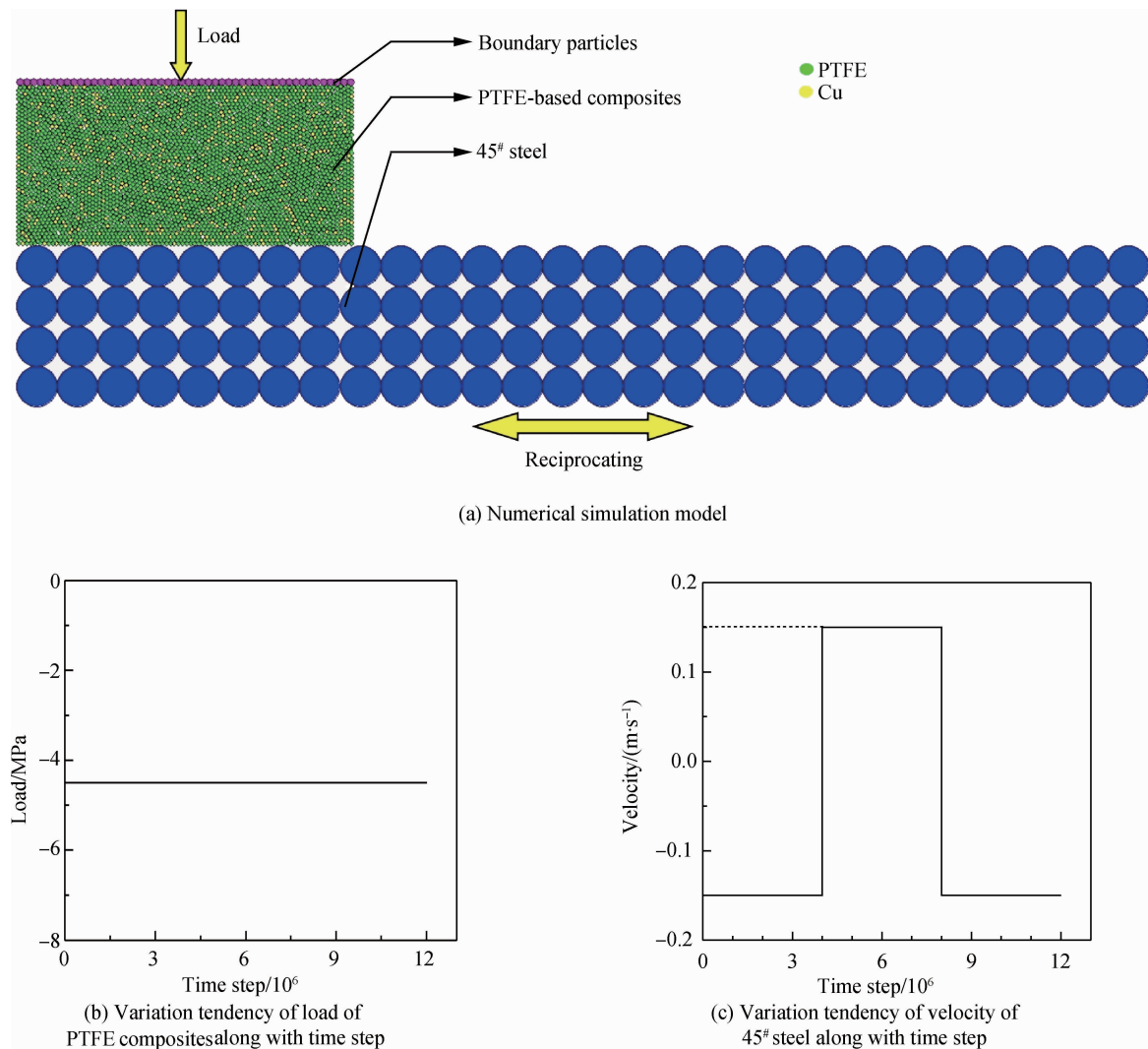


图 3 摩擦副数值模拟模型与载荷和速度条件

Fig. 3 Numerical simulation model of friction pair and load and velocity conditions

试样 45# 钢作水平匀速往复移动, 并受到一个竖直向下的载荷作用。

1.2.3 模型细观参数的选择

PFC2D 模型介质的宏观基本物理力学特征不能通过直接赋值的形式实现, 而要从逆向角度出发, 采用双轴实验^[14-15]对模型进行反复的数值模拟实验, 获得与材料宏观性质大体一致的细观参数。PTFE 颗粒、45# 钢、Cu 颗粒、PTFE 颗粒与 Cu 颗粒之间连接的细观模型参数如表 1 所示。其中, Cu 颗粒的细观参数是通过 PFC2D 程序中自带的计算公式^[14]计算得出的。在 PFC2D 系统中, 连接键之间的接触应力等于两接触颗粒的平均应力值^[16], 由此可算出 PTFE 颗粒与 Cu 颗粒之间连接键的强度等。

1.2.4 转移颗粒和磨损颗粒的定义

在摩擦过程中, 与 45# 钢表面接触的 PTFE 和 Cu 颗粒单元在摩擦力和法向压力的作用下, 颗粒单元之间的连接键逐渐断裂, 颗粒从本体脱落, 一部分脱落的颗粒在一定的条件下与 45# 钢表面颗粒建立新的连接键。参照已有研究的结果^[17-19], 在 PFC2D 程序中设定 PTFE 颗粒与 45# 钢之间的平行键强度为 8 MPa, Cu 与 45# 钢之间的连接键强度为 10 MPa。则在摩擦过程中从 PTFE 基复合材料本体脱落的颗粒会在 45# 钢表面形成一层黏附颗粒层(即转移膜), 将这部分颗粒定义为转移颗粒(一旦成为转移颗粒, PTFE 颗粒模型将变成红色以示醒目, Cu 颗粒模型颜色不变)。而另一部分没有与 45# 钢表面建立连接的颗粒, 将作为“磨屑”排

表 1 PTFE 颗粒、45# 钢、Cu 颗粒、PTFE 颗粒与 Cu 颗粒之间连接的细观模型参数

Table 1 Microscopic model parameters of PTFE particles, 45# steel, Cu particles and connection between Cu particles and PTFE particles

Parameter	PTFE particles	45# steel	Cu particles	Connection between Cu particles and PTFE particles
Density/(kg · m ⁻³)	2.2×10 ³	7.8×10 ³	8.7×10 ³	
Elastic modulus/MPa	4.1×10 ²	2.1×10 ⁵	9.0×10 ⁴	
Normal stiffness/(N · m ⁻¹)	2.8×10 ²	4.5×10 ⁵	2.1×10 ⁴	
Shear stiffness/(N · m ⁻¹)	3.2×10 ²	3.0×10 ⁵	1.4×10 ⁴	
Normal strength/N	1.1×10 ⁻⁶	2.7×10 ⁻³	9.0×10 ⁻⁶	5.05×10 ⁻⁶
Shear strength/N	7.0×10 ⁻⁷	1.6×10 ⁻³	7.2×10 ⁻⁶	3.95×10 ⁻⁶
Friction coefficient	0.06	0.25	0.20	
Porosity	0.15			
Poisson's ratio		0.27	0.34	
Particle radius/m	1.5×10 ⁻⁷	1.5×10 ⁻⁶	1.5×10 ⁻⁷	

出摩擦界面。随着摩擦的进行，转移颗粒在上试样的剪切挤压作用下与对偶件表面原本建立的连接键可能会发生断裂，转移颗粒被排出摩擦界面，形成的“空缺”会被新的转移颗粒所取代，这充分体现了转移膜的动态形成过程。磨损颗粒则可分为两类：(1) 吸附在对偶件表面的转移颗粒；(2) 被作为“磨屑”排出摩擦界面的颗粒。磨损颗粒数就是材料的磨损量。

2 数值模拟结果及分析

2.1 摩擦磨损动态过程的模拟结果

图 4 为在不同时步数下 30wt% Cu/PTFE 复合材料与 45# 钢对摩擦磨损过程的数值模拟颗粒转移过程。从图 4(a)和图 4(b)中可以看出，随着时步数的增加，上试样 PTFE 基复合材料在滑动摩擦剪切力和外界载荷的作用下，靠近摩擦界面的表层部分发生弹塑性变形，且随着摩擦的进行从复合材料基体上脱落的颗粒越来越多。这主要由于靠近摩擦界面的颗粒受到的切向力和法向力的作用超过了颗粒间的切向和法向黏结强度，颗粒之间的连接键断裂，黏结被破坏，颗粒从本体脱落。脱落的颗粒一部分作为磨屑颗粒被排出摩擦界面(图中磨屑颗粒为摩擦副接触区之外的绿色颗粒)，一部分作为转移颗粒(红色颗粒)与 45# 钢表面建立新的连接键，吸附在对偶件(45# 钢)表面，形成转移颗粒层(即转移膜)，如图 4(c)所示。在摩擦过程中始终伴随着原先的转移颗粒被新的从基体脱落的颗粒替代这一现象，而被替代的转移颗粒则变成磨屑颗粒(图中处于摩擦副接触区和对偶件表面之外的红色颗粒)被排出摩擦界面。这就很好地说明了转移颗

粒层在形成与长大过程中，始终伴随着局部脱落及再修复的过程，在形成完整的转移颗粒层后处于动态平衡状态。

图 4(c)为转移颗粒层的局部放大图，可以看出，从 30wt% Cu/PTFE 复合材料基体上脱落的颗粒球与 45# 钢表面建立了新的连接，在 45# 钢表面形成转移颗粒层。由于 Cu 颗粒与 45# 钢之间的连接键强度大于 PTFE 与 45# 钢之间的连接键强度，故 Cu 颗粒与 PTFE 颗粒相比，更不容易从 45# 钢表面脱落，且 Cu 颗粒与 PTFE 颗粒之间的连接键

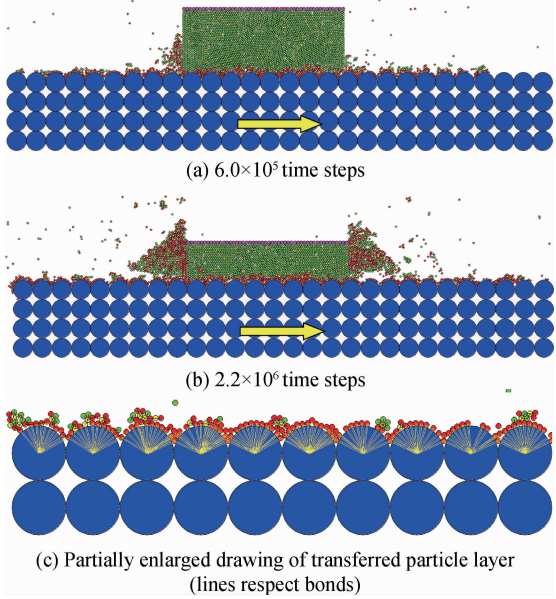


图 4 在不同时步数下 30wt% Cu/PTFE 复合材料与 45# 钢对摩擦磨损过程的数值模拟颗粒转移过程 (图中箭头为运动方向)

Fig. 4 Numerical simulation particles transfer processes of friction and wear processes of 30wt% Cu/PTFE composites rubbing with 45# steel at different time steps (arrow represents motor direction)

强度大于 PTFE 颗粒之间的连接键强度(见表 1), 故 Cu-PTFE 颗粒之间的连接键与 PTFE-PTFE 颗粒之间的连接键相比, 更不容易被破坏。综上所述, 与 45[#] 钢建立连接键的 Cu 颗粒就像“钉子”一样将 PTFE 颗粒“钉扎”在 45[#] 钢表面, 有效地促进了转移颗粒层的形成。

2.2 Cu 含量对摩擦磨损的影响

图 5 为不同 Cu 颗粒质量分数的 PTFE 基复合材料转移颗粒数与磨损颗粒数的对比。可以很明显地看到, 在摩擦初始阶段, 转移颗粒与磨损颗粒呈急剧上升趋势。在 4.0×10^6 时步数后, 转移颗粒数基本保持稳定, 磨损颗粒较摩擦初始阶段呈较缓趋势增加。这主要与转移颗粒层的形成有关, 在 $0 \sim 4.0 \times 10^6$ 时步数范围内是摩擦初始阶段, 也是转移颗粒层的形成阶段, 此时两对偶表面为 PTFE 基复合材料-45[#] 钢滑动接触, 磨损较为严重, 并逐渐在 45[#] 钢表面形成一层均匀稳定的转移颗粒层。从

4.0×10^6 时步数开始, 由于转移颗粒层基本形成, 使得滑动摩擦界面由原先的“PTFE-45[#] 钢接触”向“PTFE-PTFE 接触”转变, 摩擦降低, 磨损量减少。在摩擦磨损过程中, 转移颗粒层始终伴随着局部的脱落与再修复过程, 原先的转移颗粒被新的转移颗粒所取代, 表现在曲线图上就是转移颗粒数曲线呈小幅度上下波动。转移颗粒层的形成与稳定使得摩擦从瞬间磨损逐渐地过渡到稳定状态, 就转移颗粒层的作用来说, 一方面它保护了较软的聚合物表面, 另一方面它作为一种润滑剂, 使得两对偶表面摩擦系数降低, 磨损减少^[20]。

图 5(a)为转移颗粒数随时步数的变化趋势, 从图中可以很明显地看出, 转移颗粒数在 $0 \sim 4.0 \times 10^6$ 时步数范围内呈急剧上升趋势。在 4.0×10^6 时步数后, 纯 PTFE、20wt% Cu/PTFE、30wt% Cu/PTFE 和 40wt% Cu/PTFE 材料的转移颗粒数曲线波动不大, 而 50wt% Cu/PTFE 复合材料的转移颗

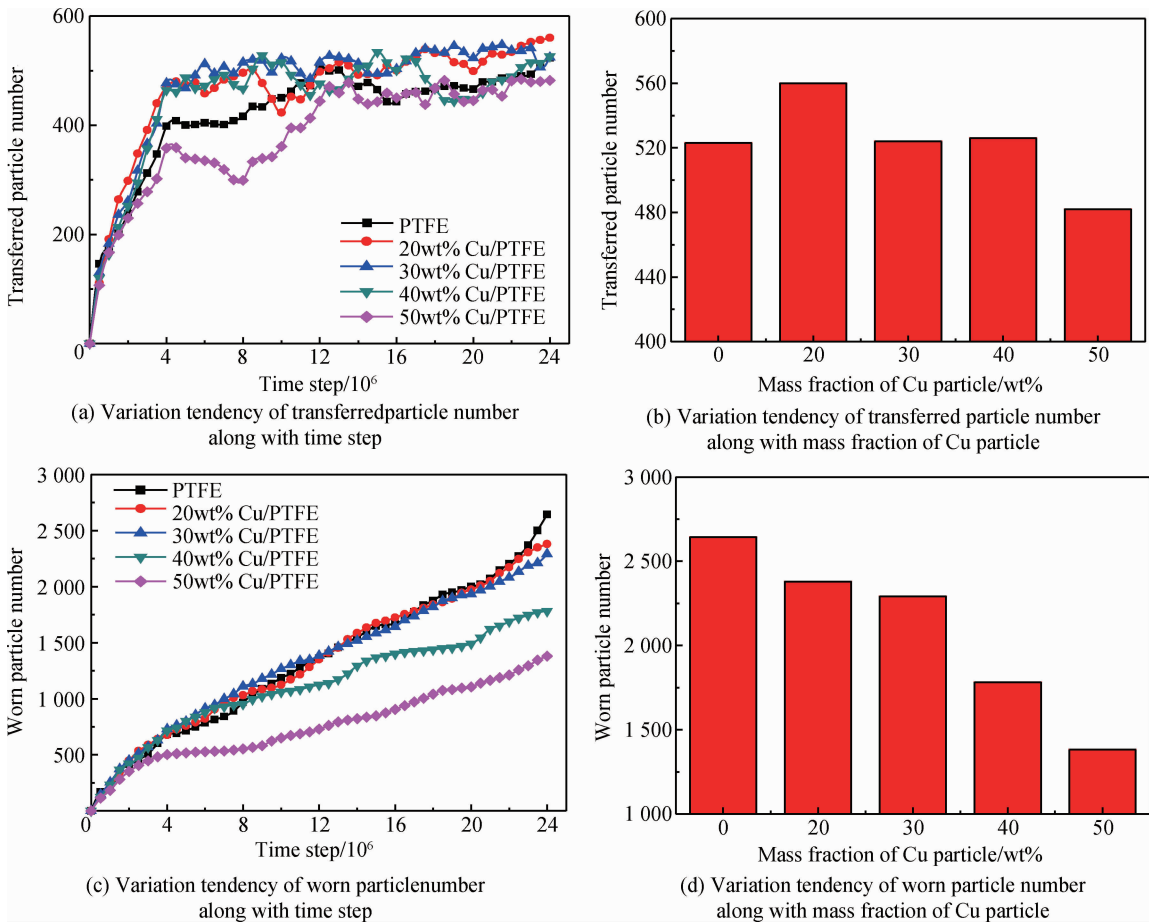


图 5 不同 Cu 颗粒质量分数的 PTFE 基复合材料转移颗粒数与磨损颗粒数的对比
Fig. 5 Number contrast of transferred particles and wear particles in PTFE-based composites with different mass fractions of Cu particles

粒数曲线随时步数的波动幅度较大。且在摩擦初始阶段, 20wt% Cu/PTFE、30wt% Cu/PTFE 和 40wt% Cu/PTFE 复合材料转移颗粒数的上升趋势较纯 PTFE 的快, 即转移颗粒层的形成速度较纯 PTFE 的快, 而 50wt% Cu/PTFE 复合材料的转移颗粒曲线始终在纯 PTFE 材料的曲线之下。图 5(b) 为转移颗粒数随 Cu 颗粒质量分数的变化趋势, 可以看出, 20wt% Cu/PTFE 复合材料的转移颗粒数最多, 纯 PTFE、30wt% Cu/PTFE 和 40wt% Cu/PTFE 材料的最终转移颗粒数近似相等, 而 50wt% Cu/PTFE 复合材料的最终转移颗粒数最少。分析图 5(a) 和图 5(b) 可知, 这主要是由于填料 Cu 颗粒的加入有两方面的作用: (1) 转移到对偶件表面的 Cu 颗粒起到了“钉扎”作用, 增加了转移颗粒层与 45# 钢之间的整体黏结强度, 使转移颗粒层上的颗粒不易在上试样的剪切挤压作用下与 45# 钢脱离, 有利于转移颗粒层的形成和完整; (2) 随着 Cu 颗粒含量的增加, 复合材料的整体强度增加, 抗剪切强度增加, 在摩擦过程中从复合材料基体脱落的颗粒逐渐减少, 即复合材料的磨损量减少, 对转移颗粒的形成有所抑制。由此可知, 一定量的 Cu 颗粒的转移对于转移层的形成和减少磨损是有利的; 但当复合材料内 Cu 颗粒太多时, 继续增加 Cu 颗粒的含量对于转移层的形成是不利的, 但对于减少磨损有利。所以在图 5(a) 中, 50wt% Cu/PTFE 复合材料的转移颗粒曲线始终在纯 PTFE 材料的曲线之下。

图 5(c) 为磨损颗粒数随时步数的变化趋势, 可以看出, 填料的加入促进了磨损颗粒数的减少。分析认为, 填料 Cu 颗粒的加入增加了颗粒之间的黏结强度, 对 PTFE 颗粒产生了束缚作用, 从而阻止了 PTFE 颗粒在摩擦过程中从基体上大面积地脱落, 且由于 Cu 颗粒与 45# 钢之间的黏结强度大于 PTFE 与 45# 钢之间的黏结强度, 故转移颗粒层中的 Cu 颗粒在一定意义上抑制了转移颗粒层的大面积剥落, 降低了转移颗粒变为磨损颗粒的数目, 减少了材料的磨损。且随着填料含量的增加磨损颗粒数减小的幅度越来越大, 如图 5(d) 所示。20wt% Cu/PTFE 和 30wt% Cu/PTFE 复合材料的磨损较纯 PTFE 材料减小的幅度小, 而当 Cu 颗粒的含量超过 30wt% 时, 材料的磨损大幅降低。分析认为, 当填料含量较低时, 对 PTFE 基复合材料的整体性能(如硬度及颗粒之间的整体黏结强度等) 的提高不

太明显, 故对 PTFE 基复合材料耐磨性能的提高是有限的。当填料含量达到一定值时, 可以大幅提高 PTFE 基复合材料的综合力学性能, 从而大大降低复合材料的磨损。从图 5 中还可以发现, 在摩擦初始阶段, 20wt% Cu/PTFE、30wt% Cu/PTFE 和 40wt% Cu/PTFE 复合材料的磨损颗粒数较纯 PTFE 的多, 其主要原因在于填料的加入促进了 PTFE 颗粒向 45# 钢表面的转移, 从基体脱落的颗粒主要用于形成转移颗粒。

综上所述, 填料的加入可以减小 PTFE 基复合材料的磨损, 其主要原因有: (1) 填料增加了转移颗粒层与对偶表面的黏结强度, 抑制了转移颗粒层的大面积剥落; (2) 填料抑制了 PTFE 颗粒之间连接键的大面积破坏, 阻止了 PTFE 颗粒大范围地脱落; (3) 填料提高了 PTFE 基复合材料整体力学性能, 提高了其承载能力及耐磨性。

此外, 数值模拟的结果与实验研究存在一定的差异。实验研究发现, 填料的加入能大幅降低聚合物材料的磨损, 而在本数值模拟过程中, 这种降低的幅度没有那么明显。这可能与以下几个方面有关: (1) 数值模型中一些参数的选择可能与实际情况存在一定的差异; (2) 数值模拟中没有考虑界面摩擦热, 而摩擦热对材料的摩擦磨损有影响; (3) 数值模拟的理想化表面形貌与实际的表面形貌存在差异。由于上述原因导致模拟结果与实验结果存在着一定的差异。但作为研究材料摩擦磨损的一种新手段, 数值模拟结果可以为实验研究提供一些理论参考, 并通过在后续的研究过程中不断地优化参数, 来更好地逼近实际情况。

3 结 论

(1) 采用 PFC2D 颗粒程序对不同 Cu 含量的 Cu 填充聚四氟乙烯(PTFE)基复合材料与 45# 钢的摩擦磨损过程进行了数值模拟。结果显示: 摩擦界面上 PTFE 基复合材料颗粒从本体脱落, 一部分作为转移颗粒吸附在 45# 钢表面, 形成转移颗粒层; 另一部分作为磨屑颗粒被排出摩擦界面。

(2) PTFE 基复合材料在 45# 钢表面形成摩擦转移颗粒层。一开始转移颗粒数逐渐增大, 一段时间后随着转移颗粒层的形成与完整, 转移颗粒数趋于一个稳定值且保持动态平衡, 这表明转移颗粒层已达到稳定平衡阶段。随着转移颗粒层(转移膜) 的形成与稳定, 磨损颗粒数的增加趋势变得比较

缓慢。

(3) 填料 Cu 颗粒的加入一方面可以通过自身转移的“钉扎”作用促进转移颗粒层的形成,另一方面由于提高了复合材料整体强度,又对颗粒的转移产生了一定的抑制作用。所以添加适当含量的 Cu 颗粒有利于转移颗粒层的形成,但过量添加则 Cu 颗粒的促进作用就会降低。

(4) 填料 Cu 的加入降低了 PTFE 基复合材料的磨损,且随着 Cu 含量的增加,减磨效果越来越明显。当 Cu 颗粒的质量分数达到 50% 时,PTFE 基复合材料的磨损颗粒数较纯 PTFE 的降低了约一半。

参考文献:

- [1] Aderikha V N, Shapovalov V N. Mechanical and tribological behavior of PTFE-polyoxadiazole fiber composites; Effect of filler treatment[J]. *Wear*, 2011, 271(5): 970-976.
- [2] Zhang Z Z, Xue Q J, Shen W C, et al. Friction and wear properties of PTFE composites filled by metal[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 1999, 15(1): 68-72 (in Chinese).
张招柱, 薛群基, 沈维长, 等. 金属填充 PTFE 复合材料的摩擦磨损性能研究[J]. *高分子材料科学与工程*, 1999, 15(1): 68-72.
- [3] Wang J X, Chen Z, Qin D T. Effect of stuffing on the properties of PTFE[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2002, 26(10): 35-37 (in Chinese).
王家序, 陈战, 秦大同. 填料对聚四氟乙烯工程塑料改性的影响[J]. *机械工程材料*, 2002, 26(10): 35-37.
- [4] Huang L, Yang R, Guo J J, et al. Friction and wear properties of PTFE-based composites filled with micron and nanometer SiO₂ particles[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(4): 82-86 (in Chinese).
黄丽, 杨儒, 郭江江, 等. 微米和纳米 SiO₂ 改性聚四氟乙烯的摩擦磨损性能[J]. *复合材料学报*, 2004, 21(4): 82-86.
- [5] Dou L X, Gong L H, Shen J, et al. Effect of composite additives on the forming and stability of transfer films of modified PTFEs[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(2): 65-69 (in Chinese).
豆立新, 龚烈航, 沈健, 等. 复合材料添加剂对改性 PTFE 的摩擦转移膜的形成和稳定作用[J]. *复合材料学报*, 2004, 21(2): 65-69.
- [6] Sawyer W G, Freudenberg K D, Bhimaraj P, et al. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles[J]. *Wear*, 2003, 254(5): 573-580.
- [7] Fillot N, Iordanoff I, Berthier Y. Modelling third body flows with a discrete element method — a tool for understanding wear with adhesive particles[J]. *Tribology International*, 2006, 40(6): 973-981.
- [8] Öqvist M. Numerical simulations of mild wear using updated geometry with different step size approaches[J]. *Wear*, 2001, 249(1): 6-11.
- [9] Schargott M, Popov V L, Dmitriev A I, et al. Development of surface topography for the rail-wheel contact[J]. *Wear*, 2008, 265(9): 1542-1548.
- [10] Zhao Y C, Liu X J, Wang W, et al. Study on the interaction of surface topography based on discrete element method[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2010(4): 487-490 (in Chinese).
赵永春, 刘小君, 王伟, 等. 基于离散元法的表面形貌相互作用研究[J]. *合肥工业大学学报*, 2010(4): 487-490.
- [11] Wang C, Tannant D D, Lilly P A. Numerical analysis of the stability of heavily jointed rock slopes using PFC2D[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(3): 415-424.
- [12] Potyondy D O, Cundall P A. A bonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [13] Liu S G, Liu H N, Wang S J, et al. Direct shear tests and PFC2D numerical simulation of intermittent joints[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(9): 1828-1836 (in Chinese).
刘顺桂, 刘海宁, 王思敬, 等. 断续节理直剪试验与 PFC2D 数值模拟分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(9): 1828-1836.
- [14] Users' manual for Particle Flow Code in 2 Dimensions (PFC2D)[CP]. Version 3.1. CG Itasca-Minneapolis Minnesota, 2002.
- [15] Zhou J, Chi Y W, Chi Y, et al. Simulation of biaxial test on sand by particle flow code[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(6): 701-704 (in Chinese).
周健, 池毓蔚, 池永, 等. 砂土双轴试验的颗粒流模拟[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(6): 701-704.
- [16] Yang D M, Sheng Y, Ye J Q, et al. Discrete element modeling of the microbond test of fiber reinforced composite[J]. *Computational Materials Science*, 2010, 49(2): 253-259.
- [17] Bahadur S, Sunkara C. Effect of transfer film structure, composition and bonding on the tribological behavior of polyphenylene sulfide filled with nano particles of TiO₂, ZnO, CuO and SiC[J]. *Wear*, 2005, 258(9): 1411-1421.
- [18] Zhou Z H. Simulation of the transfer process during friction of the PTFE composites[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013 (in Chinese).
周正华. PTFE 基复合材料摩擦转移规律模拟研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [19] Xie T, Zhou Z H, Xu Z X, et al. Characteristics of the transfer film and tribological properties of oxide/PTFE composites

- [J]. Advanced Materials Research, 2013, 631-632: 172-175.
- [20] Xie T, Wan Y Y, Miu P, et al. Dynamic transfer of PTFE three-layer composite materials during friction[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(2): 1-5 (in Chinese).
解挺, 万媛媛, 缪鹏, 等. PTFE 三层复合材料摩擦过程的界面动态迁移[J]. 润滑与密封, 2010, 35(2): 1-5.

Numerical simulation of influence of filler content on tribological properties of Cu/PTFE composites

XIE Ting*, YANG Huaping, JIANG Kai

(Institute of Tribology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to investigate the influence of filler content on the tribological properties of Cu/polytetrafluoroethene (PTFE) composites, the Particle Flow Code in 2 Dimensions (PFC2D) was employed to simulate and analysis the processes of the friction and wear of PTFE-based composites with different Cu contents sliding against 45[#] steel. The friction transfer and wear of Cu/PTFE composites were mainly studied. The simulation results show that the transferred particle layer is formed on the surface of 45[#] steel when Cu/PTFE composites form friction pair with 45[#] steel. The wear of PTFE-based composites can be reduced effectively by the formation of transferred particle layer. On one hand, the addition of Cu particles can promote the formation of transferred particle layer by “pinning” effect of self-transition. On the other hand, due to the improvement of composite integrated strength, the addition of Cu particles produces an inhibition to the formation of transferred particle layer. Therefore, the moderate addition of Cu is beneficial to the formation of transferred particle layer. However, this effect will be reduced when the content of Cu is too high. Meanwhile, the wear of PTFE-based composites is reduced effectively due to the addition of Cu particles, and antifriction effect becomes better along with the increasing of Cu content. When the mass fraction of Cu particles is 50%, the number of the wear particles of PTFE-based composites is decreased to nearly half of the pure PTFE.

Keywords: composites; filler; numerical simulation; wear; transfer