

[文章编号] 1004- 0609(2000)03- 0416- 04

混杂铝基复合材料的摩擦系数模型^①

卢德宏^{1, 2}, 金燕苹¹, 顾明元¹, 蒋业华², 周 荣²

(1. 上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030; 2. 昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650093)

[摘 要] 建立了碳化硅、石墨颗粒混杂增强铝基复合材料的摩擦系数模型。将混杂复合材料摩擦系数处理成无碳化硅时的石墨- 铝基复合材料摩擦系数分量、碳化硅对钢的刮擦而引起的摩擦系数分量两部分之和。对两部分分量分别进行了建模和计算, 然后相加得到混杂复合材料的总摩擦系数模型。通过与实验数据的比较, 表明该模型能够较准确地计算较高石墨含量的混杂铝基复合材料的摩擦系数。

[关键词] 模型; 摩擦系数; 混杂; 铝基复合材料

[中图分类号] TB331; TH114

[文献标识码] A

研究表明, 碳化硅(SiC)和石墨(Gr)颗粒混杂增强铝基复合材料(Al/SiC+ Gr)的摩擦系数随 Gr 含量的升高而降低, 而且变化是非线性的^[1]。这种变化规律与单一 Gr 颗粒增强铝基复合材料(Al/Gr)的相似^[2]。对后者而言, 当 Gr 含量为 0 时, 摩擦系数为基体合金的值; 随着 Gr 含量升高, 复合材料摩擦系数呈非线性降低; 当 Gr 达到约 20% (体积分数) 时, 摩擦系数渐渐稳定在约 0.2, 而与基体合金种类无关。由于 Gr 含量引起摩擦系数变化的原因很多, 如石墨膜的厚度和石墨膜对磨损表面的覆盖率随 Gr 含量的变化、基体对石墨膜的覆盖等, 它们还不能从物理学和力学的角度得到圆满解释, 因此目前国内外还没有建立起数学模型来描述 Al/Gr 的摩擦系数。同时, 很多研究表明, SiC 等陶瓷相对金属基复合材料的摩擦系数有影响, 有引起增大的^[3]、减小的^[4]或兼而有之的^[5]。作者研究观察到, 在 Al/SiC+ Gr 中, 由于 SiC 对钢表面有刮擦作用, 其摩擦系数的绝对值比相同 Gr 含量的 Al/Gr 的高^[1]。鉴于 SiC 和 Gr 的共同作用, 本文对 Al/SiC+ Gr 的摩擦系数进行了建模和计算, 尤其注意了 Gr 含量的影响。

1 实验

试验材料为相同 SiC 含量(20%, 体积分数, 下同)、不同 Gr 含量(3%, 6%, 12% 和 24%) 的 4 种混杂复合材料。摩擦实验是利用 MPX-2000 型销盘式磨损试验机, 在干摩擦条件和室温下进行。销、

盘试样分别用复合材料和淬火态 45 钢(HRC50)制造, 表面都经过 800# 金相砂纸磨光, 实验前都经过丙酮加超声波清洗。磨损时载荷均为 20 N(约合 0.72 MPa), 滑动速度为 0.6 m/s。利用传感器测定摩擦扭矩, 并转换求得摩擦系数。所有试验结果都是最少 3 次重复试验的平均值。实验细节可参见文献[1]。

2 模型的建立

研究表明, 在较低载荷下或较高 Gr 含量时, Gr 在表面的铺展和润滑良好, 同时碳化硅在接触面上能有效分担载荷^[1]。所以, Al/SiC+ Gr 和配偶钢的磨损表面都只有轻微的磨粒磨损发生, 极少有粘着转移, 摩擦系数也低。这种摩擦系统可以表示如图 1。此时, Al/SiC+ Gr 的摩擦系数可以考虑成两部分的和, 一是不考虑 SiC 作用时, Al/Gr 的摩擦系数, 记为 f_{ag} ; 二是 SiC 对钢表面刮擦造成的摩擦系数增量, 记为 f_p 。即,

$$f = f_{ag} + f_p \quad (1)$$

2.1 Al/Gr 的摩擦系数与 Gr 含量的关系

石墨-金属基复合材料的摩擦系数随 Gr 含量变化有一定规律^[2], 这些规律适合于用回归分析的方法加以处理。

首先必须选择适当的函数形式。在常见的函数形式中, 如一元多次函数、指数函数和对数函数等, 指数函数能够较好符合上述 Al/Gr 摩擦系数随 Gr 含量的变化规律, 其一般形式可以写为

① [收稿日期] 1999- 08- 09; [修订日期] 1999- 12- 27

[作者简介] 卢德宏(1968-), 男, 博士, 讲师。

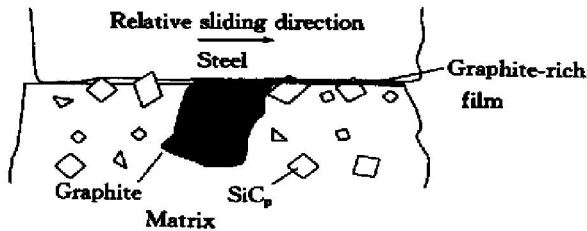


图1 混杂复合材料与钢的摩擦系统示意图

Fig.1 Model of hybrid composites wearing against steel

$$Y = A + B \exp(-X/C) \quad (2)$$

式中 A 、 B 和 C 都为常数。当 X 取 0 时, $Y = Y_0 = A + B$ 。随着 X 值上升, Y 值呈非线性下降; 当 X 达到足够大时, 第二项趋近 0, Y 趋近于常数 A 。可见, 式(2)的这些性质能够很好地符合 Al/Gr 摩擦系数随 Gr 含量的变化规律, 且 A 应该取 0.2, Y_0 取基体合金的摩擦系数, $B = Y_0 - 0.2$ 。所以, Al/Gr 摩擦系数公式可以写为

$$f_{ag} = 0.2 + (Y_0 - 0.2) \exp(-V_g/C) \quad (3)$$

式中 V_g 表示 Gr 含量。根据公式(3), 对文献[6~8]中的实验数据进行回归分析, 如图2所示。可见, 各组实验数据与回归曲线都吻合得较好, 说明公式(3)能够较好地模拟石墨-金属基复合材料的摩擦特性。就 C 的取值问题, 由图2发现, C 的值在 4~8 之间, 综合考虑与实验数据的拟合及误差, 取 C 为 6。

对于本实验, 纯铝的摩擦系数为 0.45, 则 $A = 0.2$, $B = 0.45 - 0.2 = 0.25$ 。所以, 不考虑碳化硅时石墨-铝基复合材料的摩擦系数随 Gr 变化的关系式可写为

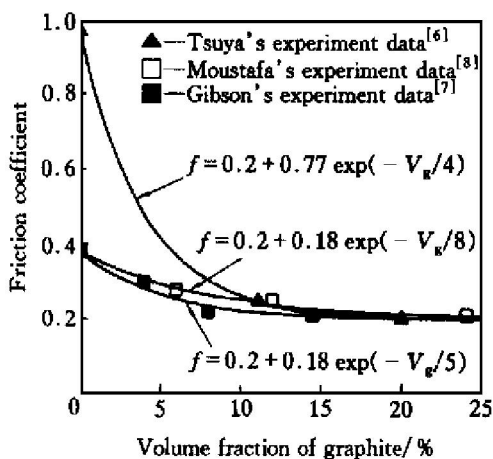


图2 各种复合材料的实验数据和回归曲线的对比

Fig.2 Comparisons of experimental data and regression curves

$$f_{ag} = 0.2 + 0.25 \exp(-V_g/6) \quad (4)$$

从上述参数的选择可知, 只要确定了基体合金的摩擦系数, 就能较准确地求出不同 Gr 含量时的摩擦系数值, 所以公式(4)对各种石墨-金属基复合材料都适用。

2.2 碳化硅对 Al/SiC+ Gr 摩擦系数的贡献

碳化硅对 Al/SiC+ Gr 摩擦系数的贡献体现在碳化硅对配偶件钢表面的显微刮擦上。由于同时参与刮擦的碳化硅颗粒很多, 碳化硅的硬度远比钢高, 钢表面光洁度非常高, 所以可以用粗糙表面刚性球体与无限大软平面接触模型来表示摩擦副, 如图3所示。

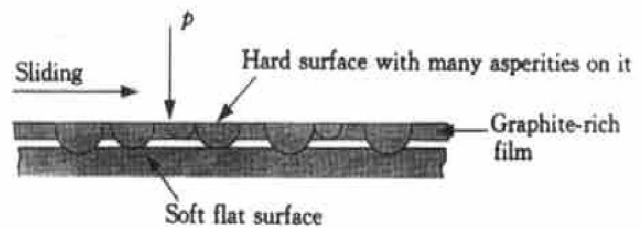


图3 多微凸体的接触磨削模型

Fig.3 Grinding model of rigid asperities to soft flat surface

根据 Klagelsky 等关于摩擦的分子-机械理论^[9], 对图3所示的多微凸体的塑性接触, 摩擦系数的机械分量可以用下式计算:

$$f_p = 0.44 \sqrt{h_1/r} \quad (5)$$

式中 h_1 表示最大的微凸体压入半无限平面的深度, 主要取决于软平面的力学性能、表面润滑状况和摩擦参数, 如载荷等^[9]; r 表示微凸体的曲率半径。在本文中, h_1 可以理解为碳化硅压入钢表面的最大深度, r 为碳化硅颗粒的等效半径。

用显微照相的方法测定钢表面由碳化硅引起的磨槽宽度 w , 然后换算成磨槽深度 h_1 。在本文中, 碳化硅颗粒形状为多角状, 其尖角角度比较分散, 可以简化成直角, 则碳化硅颗粒压入钢表面形成磨槽的宽度 w 和深度 h_1 的关系如图4所示。将测量得到的 h_1 和 r 值代入公式(5)就可得到 f_p , 即由于碳化硅对钢表面的刮擦而引起的摩擦系数增量。

将公式(4)和(5)叠加, 得到 Al/SiC+ Gr 的总摩擦系数, 如下式所示:

$$f = 0.2 + 0.25 \exp(-V_g/6) + 0.44 \sqrt{h_1/r} \quad (6)$$

3 模型的验证和讨论

首先对钢表面受到 SiC 颗粒磨削而形成的磨槽宽度进行了测量。测量结果表明, 对不同 Gr 含量

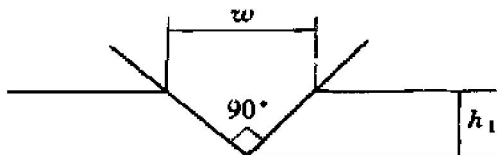


图4 颗粒压入钢表面的宽度和深度的关系

Fig. 4 Relation between width and depth of groove pressing into flat surface

的 Al/SiC+ Gr- 钢摩擦副, 磨槽宽度 w 随与钢对磨的 Al/SiC+ Gr 中的 Gr 含量增加而变小。这是因为, 在外力作用下, 摩擦表面接触时, 复合材料表面的硬质颗粒会被压入软基体中, 基体会被挤出到表面上与配偶件形成接触和摩擦, 并逐渐被磨损去除, 新的基体又逐渐被挤出。这个过程反复进行^[10]。在本实验中, 由于磨损表面存在富含 Gr 的膜层, 阻止了钢和铝基体的直接接触, 降低了摩擦系数, 所以当铝基体被挤出到表面与钢接触后不会轻易被粘着转移, 而能够持续轻微的磨损。这样, 碳化硅颗粒在铝中的部分增加, 露出表面的部分减少。随着 Al/SiC+ Gr 中 Gr 含量的变化, 磨损表面 Gr 膜层的厚度发生相应的变化, 从而导致碳化硅对钢表面的刮擦作用发生变化。

根据磨槽宽度 w , 求得各种 Gr 体积分数的 Al/SiC+ Gr 对钢表面的摩擦系数的机械分量 f_p , 如图 5 所示。图中同时示出了不考虑碳化硅时的复合材料摩擦系数随 Gr 含量变化的曲线。

进而对不同 Gr 含量的 Al/SiC+ Gr 的总摩擦系数进行了计算, 结果如图 6 所示, 并将文献[1]中的实验值也表示在图 6 中。对比两条曲线发现, 在 Gr 含量超过约 9% 时, 理论曲线和实验曲线能够较好地吻合, 而在低 Gr 含量时, 实验曲线值比理论曲线值高许多。对比图 5 可以看到, 造成在低 Gr 含量时实验曲线值比理论曲线值高的主要原因是测量所得碳化硅对钢的刮擦摩擦系数分量较低。

本文分析认为, 在 Gr 含量较低甚至没有时, 不能简单地用碳化硅对钢的刮擦来解释由于基体金属中加入碳化硅引起的摩擦系数升高。这从对单一碳化硅增强铝基复合材料的研究可以找到原因。即由于碳化硅的加入, 不但直接对配偶件有一定的刮擦作用, 而且使复合材料的磨损表面状况与基体相比有了很大的不同。比如由于复合材料的整体硬度、塑性流动强度等都提高很大, 导致磨损表面机械混合层的形成^[1, 3]。在加入少量 Gr 颗粒时, 虽然无法形成机械混合层, 但由于复合材料和配偶钢表

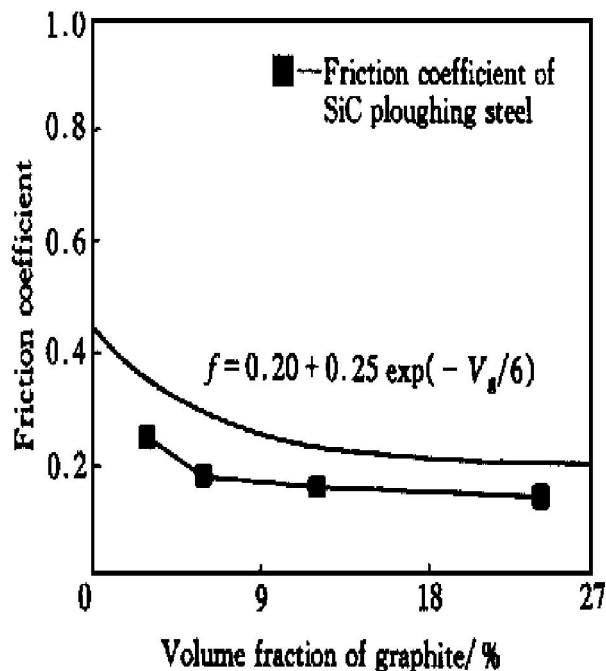


图5 SiC 刮擦钢引起的摩擦系数分量和石墨-铝基复合材料摩擦系数与石墨含量的关系

Fig. 5 Friction coefficient fraction of SiC ploughing steel and correlation of friction coefficient of Al/SiC+ Gr composite to graphite content

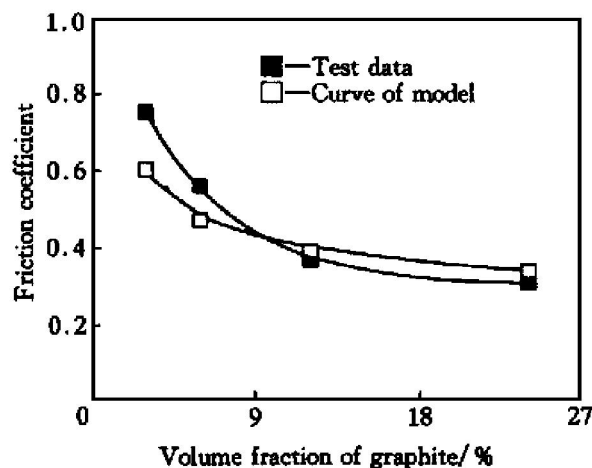


图6 实验结果与模型计算结果的对比

Fig. 6 Comparison of model results and test data^[1]

面相互发生材料的粘着转移, 转移磨粒对钢和复合材料摩擦都很严重, 所以摩擦系数也比碳化硅对钢的刮擦引起的摩擦系数大。所以, 从本文模型计算结果看, 在低 Gr 含量时, 实验结果比理论值高, 而且随 Gr 含量减少, 差值越大。

4 结论

本文将碳化硅、Gr 混杂增强复合材料的摩擦系数处理成无碳化硅时 Gr-铝基复合材料摩擦系数

分量、碳化硅对钢的刮擦而引起的摩擦系数分量两部分之和、利用回归分析的方法描述了 Gr 铝基复合材料的摩擦系数。引用摩擦的机械理论, 对碳化硅引起的摩擦系数进行了描述。该模型能够较准确地计算较高 Gr 含量 Al/SiC+ Gr 的摩擦系数。

[REFERENCES]

- [1] LU De-hong(卢德宏). PhD thesis. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 1999: 61.
- [2] Rohatgi P K, Ray S and Liu Y. Tribological properties of metal matrix-graphite particle composites [J]. Inter Mater Reviews, 1992, 37(3): 129.
- [3] Venkaraman B and Sundararajan G. The sliding wear behavior of Al-SiC particle composites—I. Macrobehavior [J]. Acta Mater, 1996, 44(2): 451.
- [4] Hosking F M, Portillo F F, Wunderlin R, et al. Composites of aluminum alloy: fabrication and wear behavior [J]. J of Mater Sci, 1982, 17: 477.
- [5] HAO Yuan(郝远), CHEN Ti-jun(陈体军) and DING Yu-tian(丁雨田). SiC_p/ZA27 复合材料的摩擦磨损性能 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1998, 8(suppl. 1): 223.
- [6] Tsuya Y. Wear and friction properties of Cu-graphite particle composites [J]. J Jpn Inst Compos, 1985, 11: 127.
- [7] Gibson P R, Clegg A J and Das A A. Wear of cast Al-Si alloys containing Gr [J]. Wear, 1984, 95: 193.
- [8] Moustafa S F. Casting of graphite Al-Si base composites [J]. Canadian Metall Quarterly, 1994, 33(3): 259.
- [9] Klagelsky I N, Dobychin M N and Kombalov V S. Friction and Wear Calculation Methods [M]. Pergamon, 1982.
- [10] Bowden F P and Tabor D. The Friction and Lubrication of Solids [M]. Oxford, 1954.

A model of friction coefficient of aluminum matrix hybrid composite

LU De-hong^{1, 2}, JIN Yan-ping¹, GU Ming-yuan¹, JIANG Ye-hua², ZHOU Rong²

(1. State Key Laboratory of Metal Matrix Composites,

Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, P. R. China;

2. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China)

[Abstract] A model of friction coefficient of aluminum matrix hybrid composite was proposed. The total friction coefficient of the hybrid composite was treated as the sum of two parts. One part is the friction coefficient of the graphite-aluminum matrix composite without consideration of silicon carbide. The other part is that resulted from silicon carbide ploughing steel. The first part was described by a regression equation using an exponential function. The second part can be induced from the classic friction theory of molecular-mechanics. The model of friction coefficient of the hybrid composite is proved to be very suitable to calculating the friction coefficient of the hybrid composite with high fraction of graphite.

[Key words] models; friction coefficient; aluminum matrix composites; hybrid composites

(编辑 袁赛前)