

TiB₂/Al 复合材料摩擦行为研究

赵敏¹, 郭兴建¹, 姜龙涛², 武高辉²

(1. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 新疆 克拉玛依 834000)

(2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 采用挤压铸造法制备 TiB₂/Al 复合材料并发现其在低载高速下具有自润滑特性, 因此借助于摩擦试验研究了载荷、滑动速度、摩擦副对该材料摩擦行为的影响。结果表明, 低载高速条件下 TiB₂/Al 复合材料与 GCr15 轴承钢室温干摩擦时, 随着滑动时间的延长, 平均摩擦系数未出现明显的上升或下降过渡现象, 仅瞬时摩擦系数呈现出不同程度的湍流波动状态。滑动速度为 0.8 m/s 时, 随着载荷的增大, TiB₂/Al 复合材料与 GCr15 干摩擦的平均摩擦系数基本不变, 但瞬时摩擦系数的波动幅度减小, 摩擦系数的标准偏差减小。载荷为 0.49 N 时, 随着滑动速度的增大, 平均摩擦系数没有明显的变化, 在 0.165~0.255 之间波动。与等速度变载荷时相比, 等载荷变速度条件下 TiB₂/Al 复合材料的摩擦系数分散性比较大。采用 GCr15 为摩擦副时, TiB₂/Al 复合材料的瞬时摩擦系数湍流波动较复合材料自摩擦时要大些。自磨时复合材料的平均摩擦系数为 0.08 左右, 与 GCr15 对磨时平均摩擦系数为 0.18 左右。

关键词: TiB₂/Al 复合材料; 挤压铸造; 摩擦; 载荷; 滑动速度

中图分类号: TB333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)05-1795-08

颗粒增强铝基复合材料是一类具有可设计性的新型耐磨材料^[1-7], TiB₂ 颗粒增强相因具有高强度、高耐磨性等优势, 近年来 TiB₂ 增强铝基复合材料备受关注^[8-10]。许多研究者对不同制备方法、不同基体合金、不同工况下的摩擦磨损性能开展了研究^[11-20]。但材料的摩擦行为具有系统依赖性, 复合材料的摩擦行为不仅与增强相的尺寸、形状、体积分数、基体与增强相的界面结合状况有关, 还会受到载荷、滑动速度、气氛等实际工况条件等因素的影响, 在不同的试验条件下得出的结果不同^[11-18]。本课题组对挤压铸造颗粒增强 TiB₂/Al 复合材料的干滑动摩擦行为进行了大量的研究, 发现在一定的工况条件下 TiB₂/Al 复合材料表现出自润滑特性^[15]。其中, 载荷和速度是工况条件中影响复合材料摩擦行为的主要因素。一般情况下, 载荷通过接触面积的大小和变形状态来影响摩擦力, 而滑动速度将引起表面层发热、变形、化学变化和磨损等等, 从而显著地影响摩擦系数。因此针对低载高速的应用背景, 对具有自润滑特性 TiB₂/Al 复合材料的摩擦行为进行研究, 分析载荷、滑动速度、摩擦副种类对其摩擦行为的影响。

1 实验

采用 TiB₂ 颗粒为增加相、6061Al 合金为基体(成分见表 1), 利用挤压铸造专利技术^[21]制备颗粒增强复合材料, 具体材料组成如表 2 所示。首先将 Al 粉和 TiB₂ 粉进行球磨处理, 之后将混合粉体置于钢模具中, 压制成预制块并放入炉中预热, 预热温度为 600~630 °C, 预热时间为 2.5 h。之后将 750~770 °C 熔融 6061Al 合金浇注到钢模中, 使其在 70~80 MPa 压力下渗透到 TiB₂ 预制块中并保持 180 s, 冷却后脱模。铝合金熔化采用高纯石墨坩埚, 其过程在氩气保护下进行, 浇铸前用六氯乙烷进行除气。

表 1 复合材料基体 6061Al 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 6061Al aluminum alloy matrix of composite (ω/%)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Ni	Al
0.43	0.75	0.22	0.36	1.26	<0.15	<0.05	<0.05	Bal.

表 2 复合材料组成

Table 2 Composition of the composites

Reinforcement	Size/μm	Volume fraction/%	Matrix alloy
TiB ₂	1.5	30	6061Al

收稿日期: 2020-08-04

作者简介: 赵敏, 女, 1977 年生, 博士, 高级工程师, 中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 新疆 克拉玛依 834000, E-mail: zhaomin@cupk.edu.cn

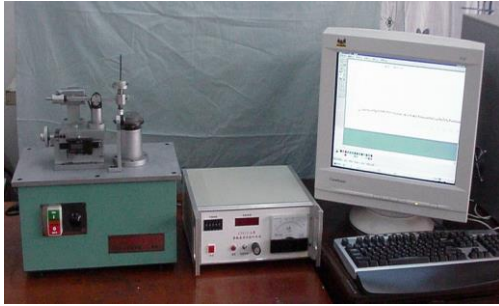


图 1 销-盘式摩擦磨损试验机

Fig.1 Picture of a pin-disk friction wear testing machine

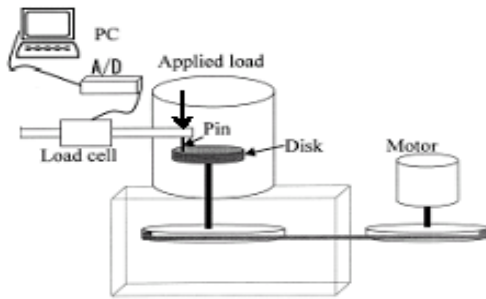


图 2 销盘试验机工作原理示意图

Fig.2 Schematic view of a pin on disk testing

摩擦试验采用自制CJS111A型销-盘式专用试验机（见图1）完成，适用于高速(0~1200 r/min)低载荷条件下(载荷为0.049~4.9 N)材料的摩擦试验，试验机工作示意图如图2所示。

摩擦试验在室温下进行，可以实时测量摩擦系数，绘制出摩擦系数随时间的变化曲线。达到稳定摩擦磨损阶段后，取5次重复试验的平均值确定为稳定阶段的平均摩擦系数。试验参数为：载荷0.049~4.9 N，滑动速度0.4~2.0 m/s，干摩擦。摩擦副选用GCr15轴承钢（淬火加回火处理），硬度为HRC 60，尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ；复合材料试样全部经过T6处理，采用线切割和车削加工。销试样的端头采用特殊的成型刀加工。图3为摩擦试验中销和摩擦副盘试样的尺寸示意图。

为了提高摩擦试验的准确性，对GCr15轴承钢磨盘的摩擦表面在试验前经过磨床研磨处理，采用1000#金相砂纸对复合材料销试样的摩擦表面进行手工研磨，并置于丙酮中用超声波清洗器处理300s后干燥待用。

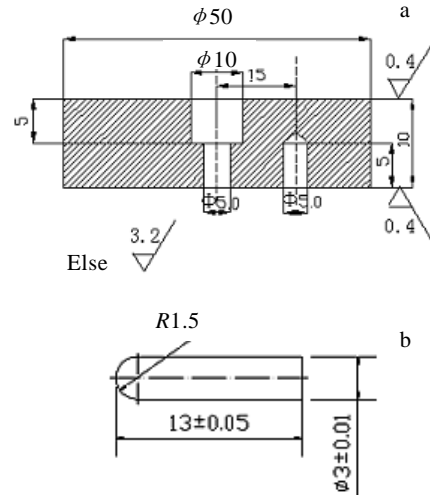


图 3 摩擦试验试样尺寸

Fig.3 Dimensions of wear specimen: (a) disk sample and (b) pin samples

2 结果与讨论

2.1 载荷对 TiB₂/Al 复合材料摩擦行为影响

图4为室温大气环境中TiB₂/Al复合材料与GCr15轴承钢作摩擦副干摩擦时不同载荷下的瞬时摩擦系数实时记录曲线。滑动速度为0.8 m/s，摩擦副为GCr15轴承钢。由图4可以看出不同载荷下TiB₂/Al复合材料的摩擦系数变化行为有3个共同特性。

1) 湍流态波动行为：在0.49~4.41 N载荷时，摩擦系数随着滑动时间的延长，出现了不同程度的波动。分析认为，这种波动主要是由材料的不均质性以及环境因素对摩擦表面物理和化学形态的不确定性造成的，也是干摩擦状态区别于良好润滑状态的特征^[22,23]。实验研究表明，干摩擦运动并非连续平稳的滑动，而是一个物体相对另一物体断续的滑动，又称为跃动现象。当2个固体表面相接触时，由于其表面凹凸不平，实际接触面积只占名义接触面积的很小一部分。也就是说，摩擦过程所产生的阻力，即摩擦力，只与实际接触面积上微凸体的具体相互干涉行为有关。因此，随着摩擦时间的延长，接触表面的微凸体不断地发生干涉并逐一破坏，由于微凸体偶对破坏强度的随机性，因而摩擦系数的大小必然也是随机波动的。因此，瞬时摩擦系数呈现出湍流波动状态。从图4中也可以发现，随着载荷的变化，这种湍流态波动也有所变化。载荷增大时，波动幅度变小。

2) 没有明显的摩擦系数上升或下降的过渡期：以往研究表明^[24]在一定的载荷和滑动速度下基体合金

和复合材料的摩擦系数随着时间的延长(滑动距离的延长)会发生变化,一般都是经过一段时间后逐渐趋于稳定。根据摩擦系数的变化可以将滑动摩擦磨损过程分为磨合磨损阶段和稳定磨损阶段。但是由图 4 可以看出,在一定的滑动速度条件下,不同载荷情况下 TiB₂/Al 复合材料的平均摩擦系数随滑动时间的变化基本没有明显变化,整个摩擦过程没有上升或下降的明显变化,没有明显的磨合阶段和稳定磨损阶段之分。为了排除载荷和滑动速度等试验参数的影响,本课题组对 SiC_p/Al 复合材料进行了相同摩擦磨损条件下的比较试验^[17],发现 SiC_p/Al 复合材料的摩擦系数曲线与以往研究的结果相一致,摩擦系数随着滑动时间的延长发生一定变化。在摩擦初期摩擦系数处于上升阶段,随着时间的延长,摩擦系数略有下降并逐渐趋于稳定。摩擦过程可分为磨合阶段和稳定摩擦阶段 2 个阶段。SiC_p/Al 复合材料大约在 15 min 时达到稳定,平均摩擦系数稳定在 0.6 左右。文献[25]中报导了颗粒增强复合材料与 17-4PH 对磨的过程中摩擦系数随滑动距离的变化行为。随着滑动距离的增加,摩擦系数先经历剧烈的波动上升阶段,然后进入稳定的阶段。而 TiB₂/Al 复合材料随着滑动时间的延长,摩擦系数只是出现了小幅度的湍流波动,没有发现通常存在于材料摩擦过程中的摩擦系数的大幅上升或下降的过渡期,在整个摩擦过程中材料的摩擦系数相对比较稳定。随摩擦时间的增加,摩擦系数有不同程度的轻微上扬,图 4b、4c 曲线上扬的最大幅度为 0.05 左右,而图 4 d

的上升的最大幅度达到 0.07 左右。

3) 随着载荷的增大,摩擦系数的平均值基本不变,但瞬时摩擦系数的波动幅度减小。将图 4 中不同滑动时间的瞬时摩擦系数利用统计学方法进行处理,得到瞬时摩擦系数直方统计图,如图 5 所示。图中的曲线是用正态分布函数拟合的结果,Mean 和 SD 分别表示平均值和标准偏差,total counts 为采集的瞬时摩擦系数的总点数。平均摩擦系数采用式(1)得出:

$$\mu = \frac{\int_0^L \mu_i dl}{L} \tag{1}$$

式中, μ_i —运行到距离 l_i 时对应的摩擦系数; L —滑行距离(滑动速度与滑行时间的乘积), m。

这些试验数据表明,载荷在 0.49~4.41 N 之间、滑动速度为 0.8 m/s 时, TiB₂/Al 复合材料与 GCr15 对磨的平均摩擦系数在 0.16~0.18 左右,考虑到试验偏差,可以认为随着载荷的增大,摩擦系数的平均值基本不变。但是载荷对摩擦系数的波动性有显著的影响,随着载荷的增大,瞬时摩擦系数的波动幅度减小,摩擦系数的标准偏差减小。

根据文献[26, 27]可知,材料摩擦系数的随机变化服从正态分布,而且摩擦系数随机波动的统计学规律,不因载荷的大小而改变。这与图 5 中的结果是一致的,摩擦系数对摩擦时间的随机变化基本服从正态分布,且不随载荷的增大而变化。

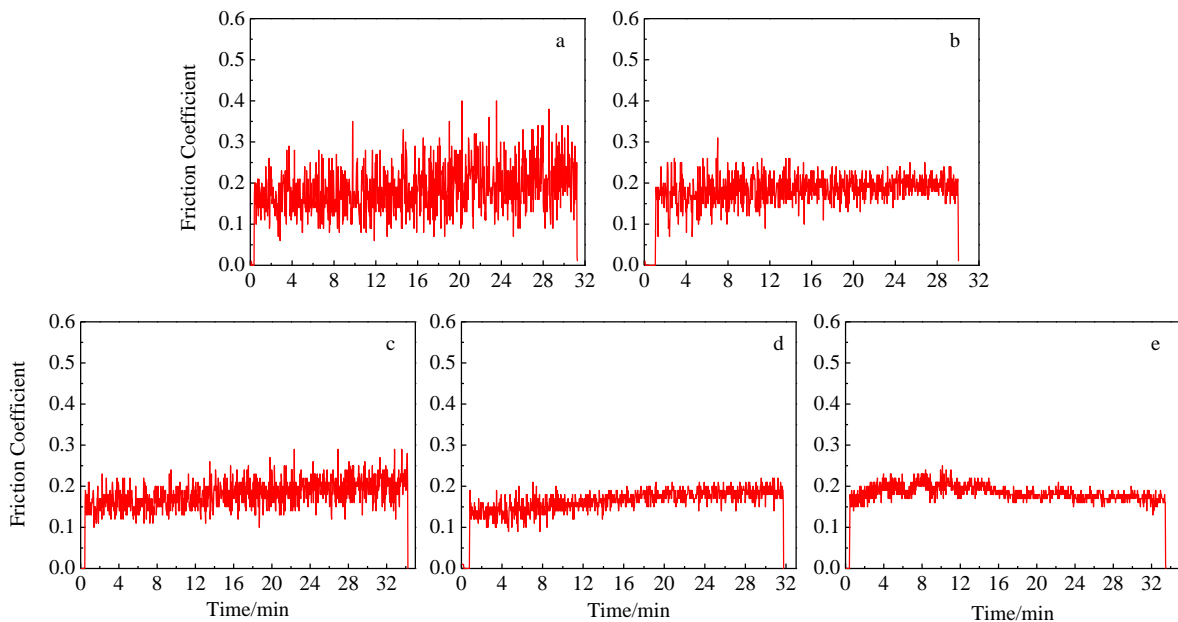


图 4 在 0.8 m/s 滑动速度不同载荷下 30vol% TiB₂/Al 复合材料瞬时摩擦系数曲线

Fig.4 Variation of instantaneous friction coefficients with time under different loads for 30vol% TiB₂/Al sliding against with GCr15 at room temperature and sliding speed of 0.8 m/s: (a) 0.49 N, (b) 1.47 N, (c) 2.45 N, (d) 3.43 N, and (e) 4.41 N

一般地，即使完全相同的试验条件，没有任何一个摩擦过程能够原样不变的重复再现。为了保证试验数据的准确性，每个参数试验重复进行 3~5 次。根据瞬时摩擦系数与时间曲线计算出材料的平均摩擦系数，得到每一参数下的平均摩擦系数的波动范围。图 6 为不同载荷下 TiB₂/Al 复合材料平均摩擦系数的波动上下限曲线。可以看出，随着载荷的增大，摩擦系数没有明显的变化趋势。当载荷在 0.49~4.41 N 变化时，TiB₂/Al 复合材料的摩擦系数基本保持在 0.2 左右，在 0.17~0.21 之间波动。文献[28]指出，摩擦系数低载时，随载荷的增加而增大。认为摩擦系数由 3 部分组成：粘着分量 μ_a 、塑性分量 μ_p 、滞后分量 μ_h ，三者的加权平均和为摩擦系数：

$$\mu = \mu_a + \mu_p + \mu_h \quad (2)$$

式(2)中，第 1 部分粘着分量 μ_a 主要来源于粘着区的剪切，第 2 部分 μ_p 和第 3 部分 μ_h 主要来源于微突体和犁沟作用，都属于犁沟分量。由第 1 部分粘着分量 μ_a 知，随着载荷的加大，粘着面积增大，使得粘着分量 μ_a 增大，因此低载时，摩擦系数是随载荷的增加而增大的。但该结果不符合这一规律，分析认为这可能与材料性质及具体摩擦条件和磨损机制有关系。

2.2 滑动速度对 TiB₂/Al 复合材料摩擦磨损性能影响

图 7 为 TiB₂/Al 复合材料在相同载荷 (0.49 N) 不同

滑动速度下与 GCr15 轴承钢干摩擦时的原始摩擦系数曲线。可以看到，与载荷对 TiB₂/Al 复合材料瞬时摩擦曲线的影响相似。随摩擦时间的增加，摩擦系数曲线也出现了湍流态的波动行为。与图 4 中摩擦系数的波动幅度随载荷增大而减小的情况不同，随着滑动速度的变化，这种湍流波动情况变化不明显。与文献[28]报道的钢对钢滑动摩擦过程中摩擦系数的变化幅度随滑动速度增加而减小的情况不同。与文献[24,29]中报道的摩擦系数在摩擦过程初期增大或减小的情况不同，整个摩擦过程中材料的摩擦系数相对比较稳定，没有明显的大幅上升或者下降的情况出现，都是在 0.2 上下波动。随着滑动时间的增加，平均摩擦系数都有不同程度的增加，尤其是滑动速度比较大时更为明显，图 7c 中摩擦系数曲线上扬的最大幅度为 0.05 左右，而图 7e 中最大幅度达到 0.07 左右。但平均摩擦系数都保持在 0.3 以下。

图 8 是图 7 对应的瞬时摩擦系数直方统计图。图中的曲线是用正态分布函数拟合的结果，Mean 和 SD 分别表示平均值和标准偏差。这些试验数据表明，滑动速度对摩擦系数的波动性和平均值没有显著的影响。随着滑动速度的增大，摩擦系数的标准偏差和平均值没有明显的增大或减小的规律性变化。考虑到标准偏差，随着滑动速度的增大，摩擦系数的平均值基本不变，在 0.16~0.18 之间。可见，TiB₂/Al 复合材料的摩擦系数对

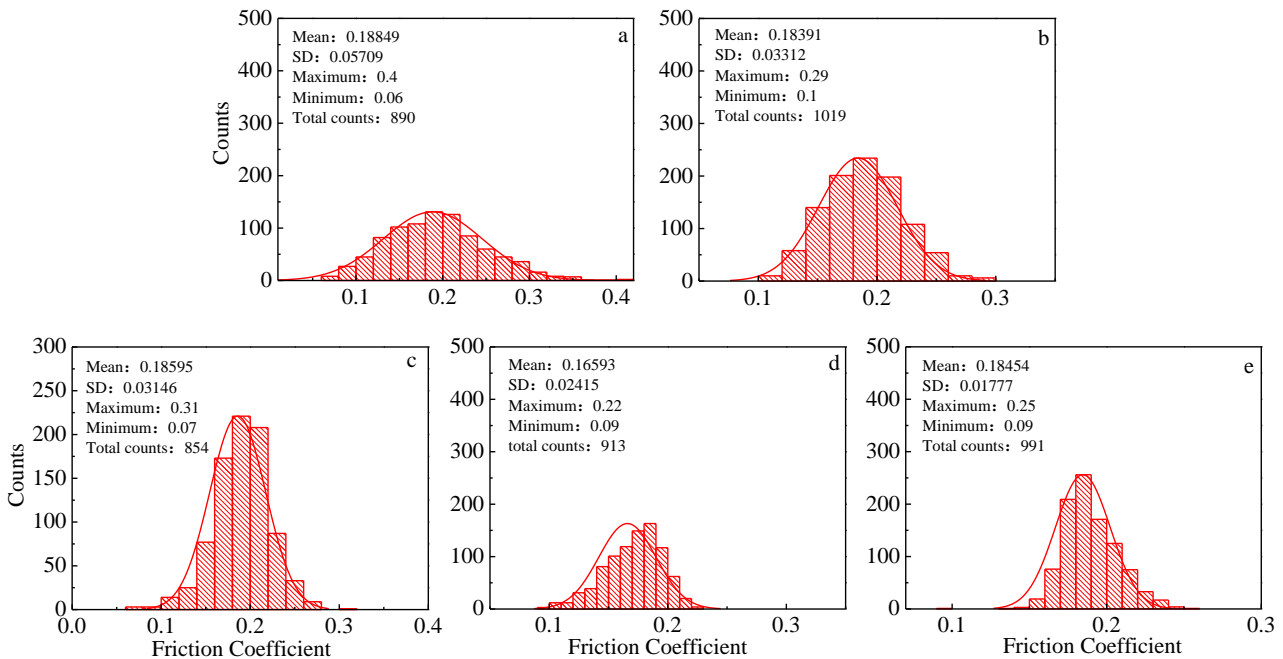


图 5 与图 4 对应的在 0.8 m/s 下不同载荷下 30vol% TiB₂/Al 复合材料瞬时摩擦系数波动统计直方图

Fig.5 Histograms of instantaneous friction coefficients with time under different loads and speed of 0.8m/s for 30vol% TiB₂/Al according to Fig.4:

(a) 0.49 N, (b) 1.47 N, (c) 2.45 N, (d) 3.43 N, and (e) 4.41 N

滑动速度的依赖性要明显小于对载荷的依赖性。同一载荷下, 滑动速度对 TiB₂/Al 复合材料的摩擦系数的影响很小。而且由图 8 中的拟合的曲线可以看出, 随着摩擦时间的延长, 摩擦系数值的随机变化也服从正态分布, 而且这种随机波动的统计学规律, 不因滑动速度的大小而改变。这与之前变载荷摩擦条件下的结果相同。

影响材料摩擦系数的因素比较多。摩擦系数与材料的表面性质、表面形貌、环境温度和实际工作条件及测试仪器等都有关系, 所以摩擦磨损试验数据有一定分散度。图 9 为不同滑动速度下平均摩擦系数的波动上下限曲线。由图中可见, 同一载荷下, 随着滑动速度的增加, 材料的平均摩擦系数没有明显的变化, 在 0.165~0.255 之间波动。与等速度变载荷时相比, 等载荷变速度条件下 TiB₂/Al 复合材料的摩擦系数分散性比较大。这可能与试验的具体环境和仪器有关, 滑动速度增大后, 试验机的转速增大, 试样的跃动也在逐渐增大, 而且磨损试验本身就存在一定的分散性。但是所有的摩擦系数数据仍然分布在 0.15~0.30 之间, TiB₂/Al 复合材料室温干摩擦时表现出了良好的摩擦性能。

根据以往的研究结果^[28], 滑动速度对摩擦系数的影响可以采用下列关系式:

$$f = (a + bU)e^{-cU} + d \quad (3)$$

式中, f 为摩擦系数, U 为滑动速度, a 、 b 、 c 和 d 是由

材料性质和载荷决定的常数。滑动速度影响摩擦力主要决定于温度状况。滑动速度引起的发热和温度变化, 改变了表面层的性质以及摩擦过程中表面的相互作用和破坏条件, 因而材料的摩擦系数必将随之变化。而对于在很宽的温度范围内机械性质保持不变的如石墨, 摩擦系数几乎不受滑动速度的影响。可见, 在低载高速摩擦条件下, 滑动速度对 TiB₂/Al 复合材料的摩擦系数的影响与石墨的情况相似。

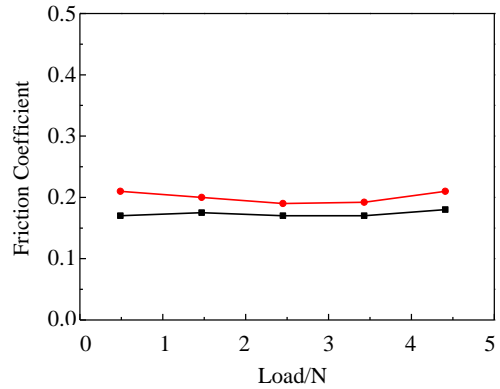


图 6 载荷对 TiB₂/Al 复合材料摩擦系数的影响

Fig.6 Effect of loads on the friction coefficient of TiB₂/Al composites 0.8 m/s

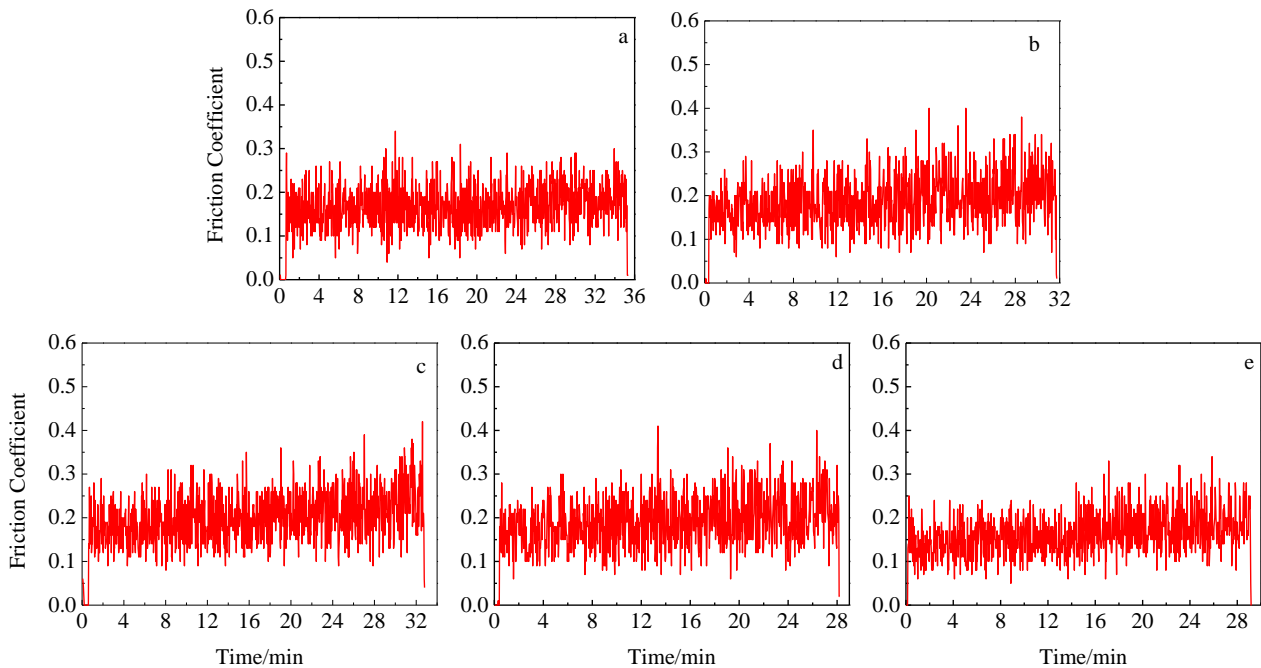


图 7 室温不同滑动速度下 30vol%TiB₂/Al 与 GCr15 对磨的瞬时摩擦系数曲线

Fig.7 Variation of friction coefficients with time at room temperature and different speeds for 30vol%TiB₂/Al sliding against with GCr15 (0.49 N):

(a) 0.4 m/s, (b) 0.8 m/s, (c) 1.2 m/s, (d) 1.6 m/s, and (e) 2.0 m/s

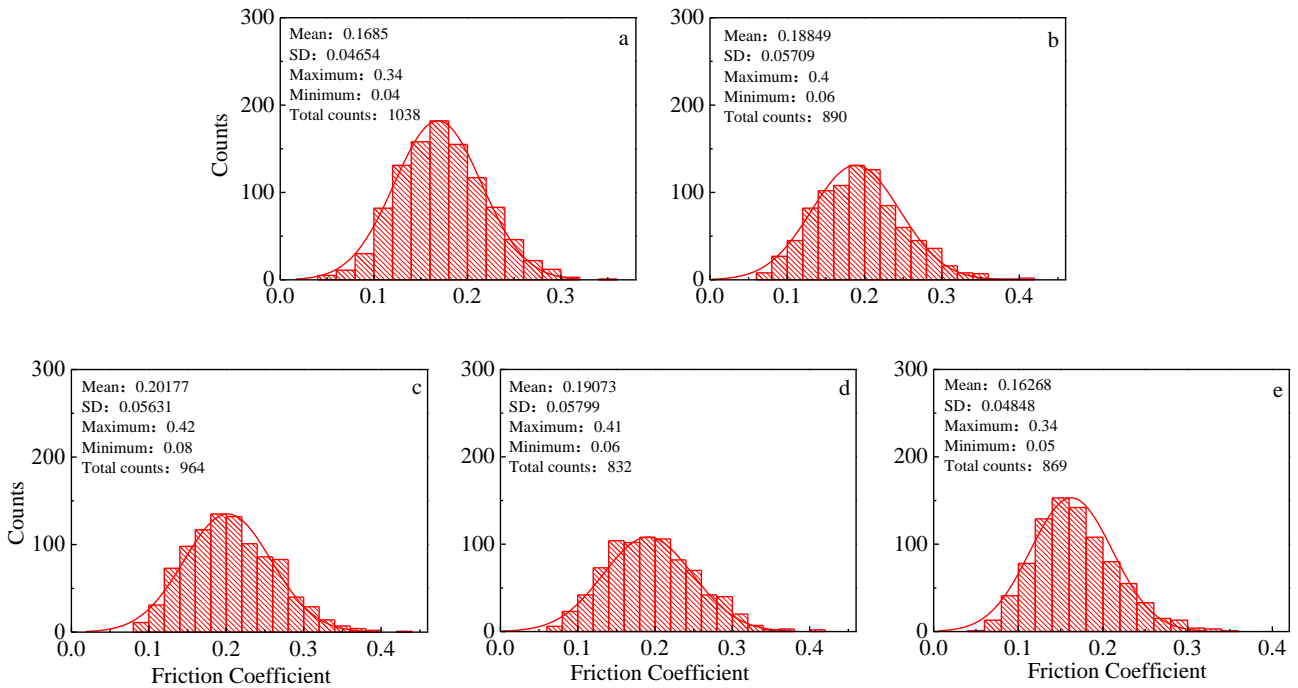


图 8 与图 7 对应的在不同滑动速度下 30vol%TiB₂/Al 复合材料瞬时摩擦系数波动统计直方图

Fig.8 Histograms of instantaneous friction coefficients with time at different speeds for 30vol% TiB₂/Al according to Fig.7: (a) 0.4 m/s, (b) 0.8 m/s, (c) 1.2 m/s, (d) 1.6 m/s, and (e) 2.0 m/s

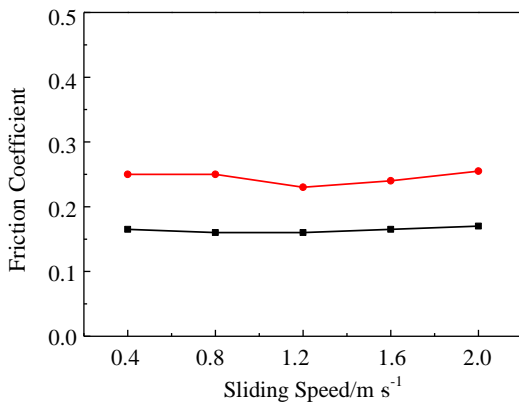


图 9 滑动速度对 TiB₂/Al 复合材料摩擦系数的影响

Fig.9 Effect of sliding speed on the friction coefficient of TiB₂/Al composites (0.49 N)

2.3 摩擦副对 TiB₂/Al 复合材料摩擦行为影响

无论在干摩擦或有润滑的条件下,不同对偶材料所组成的摩擦副在同一工况下进行摩擦,其摩擦系数是不同的。材料的摩擦系数随着摩擦副的不同而各异。通常互溶性较大的金属摩擦副因其较易粘着,故摩擦系数较大,而互溶性较小的金属摩擦副一般不易粘着,故其摩

擦系数较小。GCr15 轴承钢硬度较高,是经常采用的金属摩擦副材料。对采用 GCr15 轴承钢和 TiB₂/Al 复合材料做摩擦副时 TiB₂/Al 复合材料的摩擦系数变化规律进行了研究。

图 10 为 TiB₂/Al 复合材料自磨时瞬时摩擦系数随时间的变化曲线,其中载荷为 0.49 N,滑动速度为 0.8 m/s。相同载荷和相同滑动速度条件下,TiB₂/Al 复合材料与 GCr15 摩擦时瞬时摩擦系数随时间的变化曲线见图 4a。从图 10 和图 4a 中可看出采用不同摩擦副时,TiB₂/Al 复合材料的瞬时摩擦系数都出现了不同程度的湍流波动,采用 GCr15 时摩擦系数的波动要大些;随着滑动时间的延长,复合材料的平均摩擦系数没有大幅上升或下降的趋势,变化比较平缓。可见,TiB₂/Al 复合材料自磨时摩擦系数的变化规律与通常文献[30]中报道的同种材料互为摩擦副时易发生粘着而使摩擦系数升高的结果不同。自磨时复合材料的平均摩擦系数较低,一直稳定在 0.08 左右;和 GCr15 对磨时平均摩擦系数一直稳定在 0.18 左右。

采用不同摩擦副时,TiB₂/Al 复合材料的摩擦系数随摩擦时间延长的变化规律相同,但是摩擦系数却相差比较大,这可能与磨损过程中 TiB₂/Al 复合材料与对磨副之间的作用有关系,复合材料自磨时暴露在摩擦

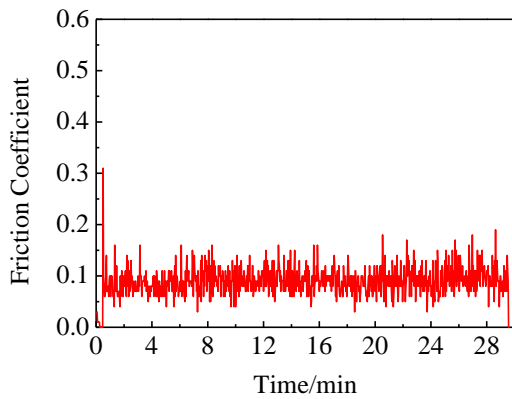


图10 TiB₂/Al 复合材料自磨时的摩擦系数曲线

Fig.10 Friction coefficient curve of TiB₂/Al composite at self-grinding

表面的 TiB₂ 颗粒比与 GCr15 轴承钢摩擦时要多, 机理与材料的自润滑特性有关^[15]。

3 结论

1) TiB₂/Al 复合材料与 GCr15 轴承钢室温干摩擦时, 低载荷条件下, 摩擦系数随着滑动时间的延长, 瞬时摩擦系数呈现出不同程度的湍流波动状态, 并且没有明显的摩擦系数上升或下降的过渡期。

2) 载荷在 0.49~4.41 N 之间、滑动速度为 0.8 m/s 时, TiB₂/Al 复合材料与 GCr15 对磨的平均摩擦系数随着载荷的增大, 摩擦系数的平均值基本不变。但是载荷对摩擦系数的波动性有显著的影响, 随着载荷的增大, 瞬时摩擦系数的波动幅度减小, 摩擦系数的标准偏差减小。

3) 载荷为 0.49 N、滑动速度为 0.8~2.0 m/s 时, 随着滑动速度的增大, TiB₂/Al 复合材料与 GCr15 轴承钢干摩擦时的原始摩擦系数曲线变化规律, 与载荷对 TiB₂/Al 复合材料瞬时摩擦曲线的影响相似, 但湍流波动情况变化不明显。材料的平均摩擦系数没有明显的变化, 在 0.165~0.255 之间波动。与等速度变载荷时相比, 等载荷变速度条件下 TiB₂/Al 复合材料的摩擦系数分散性比较大。

4) 在低载高速条件下, 不同摩擦副时 TiB₂/Al 复合材料的瞬时摩擦系数都出现了不同程度的湍流波动, 采用 GCr15 时摩擦系数的波动要大些。自磨时复合材料的平均摩擦系数较低, 一直稳定在 0.08 左右; 和 GCr15 对磨时平均摩擦系数一直稳定在 0.18 左右。

参考文献 References

[1] Carvalho O, Buciumeanu M, Madeira S *et al. Tribology International*[J], 2015, 90: 148

[2] Kanthavel K, Sumesh K R, Saravanakumar P. *Alexandria Engineering Journal*[J], 2016, 55(1): 13

[3] Rajeev V R, Dwivedi D K, Jain S C. *Materials & Design*[J], 2010, 31(10): 4951

[4] Fatih Erdemir, Aykut Canakci, Temel Varol *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 644: 589

[5] Dipankar Dey, Abhijit Bhowmik, Ajay Biswas. *Materials Today: Proceedings*[J], 2020, 26(2): 1203

[6] Mohammad Narimani, Behnam Lotfi, Zohreh Sadeghian. *Surface and Coatings Technology*[J], 2016, 285: 1

[7] Chen F, Wang T M, Chen Z N *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(1): 103

[8] Gao Q, Wu S, Lü S *et al. Materials & Design*[J], 2016, 94: 79

[9] Li Meijuan, Ma Kaka, Jiang Lin *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 656: 241

[10] Guo Q, Jiang L T, Chen G Q *et al. Micron*[J], 2012, 43(2-3): 380

[11] Niranjana K, Lakshminarayanan P R. *Materials & Design*[J], 2013, 47: 167

[12] Tee K L, Lu L, Lai M O. *Wear*[J], 2000, 240(1-2): 59

[13] Kumar S, Sarma Subramanya V, Murty B S. *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 465(1-2): 160

[14] Mandal A, Chakraborty M, Murty B S. *Wear*[J], 2007, 262(1-2): 160

[15] Zhao M, Wu G, Jiang L *et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*[J], 2006, 37(11): 1916

[16] Tian S F, Jiang L T, Guo Q *et al. Materials & Design*[J], 2014, 53: 129

[17] Pramod S L, Prasada Rao A K, Murty B S *et al. Materials & Design*[J], 2015, 78: 85

[18] Michael Rajan H B, Ramabalan S, Dinaharan I. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*[J], 2014, 14(1): 72

[19] Zhang S L, Dong X W, Zhao Y T *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(12): 3894

[20] Mandal A, Murty B S, Chakraborty M. *Wear*[J], 2009, 266(7-8): 865

[21] Wu Gaohui(武高辉). *Chinese Patent*(中国专利), 94114284.X[P], 2014

[22] Wen Shizhu(温诗铸), Huang Ping(黄平). *Tribological Principle*(摩擦学原理)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 276

[23] Bai Mingwu, Xue Qunji, Guo Huifang. *Wear*[J], 1996, 195: 152

[24] Wu Jiejun(吴洁君), Wang Dianbin(王殿斌), Gui Manchang(桂满昌) *et al. Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 1999, 23(3): 214

[25] Sannino A P, Rack H J. *Wear*[J], 1996, 197: 151

- [26] Suh Nam P. *Tribophysics*[M]. Beijing: World Publishing Corporation, 1989
- [27] Zhai Hongxiang. *Proceedings of III International Symposium on Tribo-Fatigue*[C]. Beijing: ISTF, 2000: 374
- [28] Sun Jiashu(孙家枢). *Wear of Metal(金属的磨损)*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996: 175
- [29] Chen Yue(陈跃), Xing Jiandong(邢建东), Zhang Yongzhen(张永振) *et al. Tribology(摩擦学学报)*[J], 2001, 21(4): 251
- [30] Shi Miaomiao(石淼淼). *Solid Lubricating Material(固体润滑材料)*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 14

Study on Friction Behavior of TiB₂/Al Composites

Zhao Min¹, Guo Xingjian¹, Jiang Longtao², Wu Gaohui²

(1. Karamay Campus of China University of Petroleum (Beijing), Karamay 834000, China)

(2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: 30vol%TiB₂/Al composites were fabricated by squeeze casting technology, and its self-lubricating characteristics under low load and high speed were found. Therefore, the influence of load, sliding velocity and friction pair on the friction behavior of the material was studied by friction tests. The results show that under low load and high speed, TiB₂/Al composite and GCr15 bearing steel are under dry friction at room temperature, with the extension of sliding time, the average friction coefficient does not show obviously increasing or decreasing phenomenon, only the instantaneous friction coefficient presents different degree of turbulent fluctuation. In addition, At sliding velocity of 0.8 m/s, with the increase of the load, the average friction coefficient of TiB₂/Al composite with GCr15 is basically unchanged, but the fluctuation amplitude of the instantaneous friction coefficient decreases, and the standard deviation of its friction coefficient decreases. While at 0.49 N, the average friction coefficient does not change significantly with the increase of sliding velocity, fluctuating between 0.165~0.255. The friction coefficient dispersion of TiB₂/Al composites under constant load and variable velocity is higher than that under constant velocity and variable load. When GCr15 is used as friction pair, the turbulent fluctuation of instantaneous friction coefficient is larger than that of composite itself. The average friction coefficient of composites is stable at about 0.08. When grinding with GCr15, the average friction coefficient is stable at about 0.18.

Key words: TiB₂/Al composite; squeeze casting; friction; load; sliding velocity

Corresponding author: Zhao Min, Ph. D., Senior Engineer, Karamay Campus of China University of Petroleum (Beijing), Karamay 834000, P. R. China, E-mail: zhaomin@cupk.edu.cn