

Sliding Tribological Behavior of SiCp/Al Composites Fabricated by Pressureless Infiltration under the State of Boundary Lubrication

Yan Cui¹, Yuan-gang Cao², Jing-xin Qu²

¹ National Key Laboratory of Advanced Composites, Beijing Institute of Aeronautical Material, BIAM, Beijing, China, 100095;

² School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), CUMTB, Beijing, China, 100083

Email: yan62128.cui@sohu.com

Abstract: By using M-200 wear testing machine and the SiCp/Al block vs. GCr15 steel ring tribo-pairs, the effect of the volume fraction and size of SiC particle, applied load and sliding speed on the friction and wear behavior of the SiCp/Al composites fabricated by pressureless infiltration was investigated under boundary lubrication condition. The results showed that the friction coefficient and wear rate of SiCp/Al composites were significantly affected by applied load and volume fraction of SiC particle, the wear rate of composites increased and the friction coefficient decreased with increasing applied load, the friction coefficient of SiCp/Al composites reached the upper limit of variation when volume fraction of SiC particle was 45%. The SiCp/Al composite has a minimum wear rate when volume fraction of SiC particle was about 45%, as well as maximum wear rate when volume fraction of SiC particle was about 25%. Decreasing size of SiC particle and sliding speed would result in increased wear resistance. The above mentioned the friction and wear behavior of the SiCp/Al composites were significantly affected by the boundary film between tribo-pairs.

Keywords: composites; SiCp/Al; pressureless infiltration; boundary lubrication; friction and wear

无压浸渗 SiCp/Al 复合材料在边界润滑状态下的摩擦磨损行为

崔 岩¹, 曹远刚², 曲敬信²

¹ 北京航空材料研究院 先进复合材料国防科技重点实验室, 北京, 中国, 100095

² 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京, 中国, 100083

Email: yan62128.cui@sohu.com

摘 要: 本文通过在 M-200 型摩擦磨损试验机上进行以 GCr15 钢环为对磨件的环-块边界润滑状态下的滑动磨损试验, 系统研究了无压浸渗法制备的不同体份、不同 SiC 颗粒粒度的 SiCp/Al 复合材料的摩擦磨损行为, 揭示出载荷、速度、材料特性等因素对该材料边界润滑状态下摩擦系数和磨损量的影响规律: 随载荷加大, 磨损量增大、摩擦系数却呈减小趋势; SiC 颗粒体积分数对摩擦系数及磨损量的影响较为复杂, 45%的体份是摩擦系数由升高到降低的转折点, 磨损量在 25%的体份时较大、45-55%时较小, 这主要与边界膜的面积及其良好程度有关; SiC 颗粒越小越耐磨, 这主要与摩擦表面的分形特性有关, 颗粒度小的形成的分形表面有利于边界膜的保护作用; 在高速下的磨损量要大于低速下的磨损量。

关键词: 复合材料; SiCp/Al; 无压浸渗; 边界润滑; 摩擦磨损

1 引言

SiC 颗粒增强铝基复合材料(一般简写成 SiCp/Al)可以说是目前已经开发出的金属基复合材料中最廉价

基金来源: 国家 863 计划资助项目(2007AA03Z544)

的、最有可能实现大规模商业化的品种。由于硬质颗粒的加入, SiC 颗粒增强铝基复合材料表现出优良的耐磨性, 因此在一些耐磨工程领域(如汽车驱动轴、气缸套、发动机活塞、刹车盘等)率先得到了应用^[1-3]。SiCp/Al 复合材料的摩擦磨损是一个相当复杂的过程,

其影响因素众多,既有内部因素(颗粒尺寸、颗粒体积分数、热处理状态等),又有外在因素(载荷、速度、相对运动方式、配副材料、润滑情况等),不同的研究人员由于研究的方法、实验的条件不同,得到的结论也不尽相同,有的甚至完全相反^[4-6]。另外,大多数的研究对象集中在 SiCp/Al 复合材料—钢摩擦副的干摩擦磨损, SiC 颗粒体积分数也主要集中在 10%~30% 左右^[7-9]。有关中、高颗粒体积分数 SiCp/Al 复合材料的摩擦磨损性能的研究明显不足,尤其是有关 SiCp/Al 复合材料在边界润滑状态下的摩擦磨损性能研究几乎没有涉及。然而,在各种机械中的运动大多数运动副并不是在完全流体润滑状态下运转的,特别是在启动、停止、慢速运转、载荷或速度突变的瞬间、供油不足的情况下,摩擦副往往处于边界润滑状态。边界润滑过程复杂,涉及到了冶金学、表面粗糙度、物理和化学过程等,且影响因素众多,因此研究 SiCp/Al 复合材料在边界润滑状态下的摩擦磨损行为是十分必要的。本文将通过采用有效的可控制备技术实现 SiCp/Al 复合材料颗粒尺寸或其体积分数等单因素的调整,进而在大体份变化范围内(15%~55%),研究各种因素对边界润滑状态下的滑动摩擦磨损行为的影响,这在理论上和实际应用上都有重要的意义。

2 实验

2.1 材料制备

为了真正实现单因素调整(特别是 15%~55% 的大跨度的体份调整)、客观地揭示 SiC 颗粒尺寸及体积分数对 SiCp/Al 复合材料摩擦磨损行为的影响,本实验采用同一种制备工艺方法—熔铝无压浸渗法、在完全相同的工艺条件和工艺参数下制备了不同 SiC 颗粒粒度、不同体积分数的 SiCp/Al 系列复合材料。SiC 颗粒平均尺寸分别为 110 μ m、63 μ m, SiC 颗粒体积分数分别为 15%、25%、35%、45%、55%,基体合金为自行研制 Al-Si-Mg 系专用基体合金。

2.2 摩擦磨损实验

2.2.1 摩擦磨损实验方法

本文采用 M-200 型摩擦磨损试验机进行环-块边界润滑状态下的摩擦磨损试验,试验采用的载荷分别为 294N、490N、686N,试验机器的滑动速度选择 0.42m/s、0.84m/s 两种。润滑油为 30#机油,滴量为 0.02ml/min。铝基复合材料加工成块试样,尺寸为 12

mm $\times$ 10mm $\times$ 10mm,对磨件为 GCr15 钢,其形状及尺寸为带 Φ 16mm 内孔的 Φ 45 mm $\times$ 10mm 圆环,硬度为 HRC63。铝基复合材料试块与对磨环对磨的时间为 50min。试验前后均用丙酮超声波清洗 10min,之后对铝基复合材料烘干。

2.2.2 摩擦系数的测量

在 M-200 上进行摩擦磨损试验时,用纸带记录摩擦过程中摩擦力矩随滑动距离的变化关系,从而通过公式 $\mu=T/P \cdot R$ 计算出任意时刻的摩擦系数,该公式中 μ 为摩擦系数、 T 为摩擦力矩(N $\cdot$ m)、 P 为载荷(N)、 R 为环块试样半径(m)。

2.2.3 磨损量的测量

由于边界润滑状态下磨损失重很小,普通的电子天平无法称量,因此,本文采用图像技术来定量测量磨痕面积从而确定磨损量。本实验采用 700 万像素的数码相机采集磨痕图像,其分辨率超过 300dpi,能很好的满足图像采集的要求。将采集的图片保存为 JPEG 文件格式,通过 photoshop 进行图像增强,利用其强大的选择工具对感兴趣的区域进行精确的选择,然后对感兴趣区域和不感兴趣的区域进行分别填充,将其灰度值区分增大。再将 RGB 彩色图像转换为灰度图像,然后对灰度图像滤波,再转换为二值图像,再通过图像分割,通过 Matlab 软件计算出所需要的区域的面积。

3 结果与讨论

3.1 边界润滑状态下的材料摩擦系数及其分析

本文主要研究了在 SiCp/Al 复合材料块与 GCr15 钢环边界润滑状态下对磨时,不同载荷、不同滑动速度以及不同的材料特性(即不同的 SiC 颗粒粒度和 SiC 颗粒体积分数)对摩擦系数的影响。

在边界润滑状态下摩擦实验时首先发现的现象是:整个实验过程中,摩擦系数都非常的平稳。在润滑剂的作用下,试验一开始,摩擦磨损很快就跨过摩擦磨损的非稳定阶段,进入稳定磨损阶段。因而在坐标纸上没有明显的像干摩擦那样有跑回阶段、稳定的氧化磨损阶段、剧烈磨损阶段之分。

本文所发现的不同载荷、不同滑动速度以及不同的材料特性对 SiCp/Al 复合材料摩擦系数的影响规律可以概括为:与载荷及 SiC 颗粒体积分数对摩擦系数的显著影响相比, SiC 颗粒粒度及滑动速度对摩擦系数的影响都较小。

图 1 为边界润滑状态下、滑动速度 0.84m/s、SiC 颗粒平均尺寸 110 μ m 时,不同载荷(294N、490N、686N)、不同 SiC 颗粒体积分数与 SiCp/Al 复合材料摩擦系数之间的对应关系。从图 1 中可以看出,总体来说(忽略体份 15%时的摩擦系数情况),随着载荷的加大,摩擦系数呈现出减小的趋势。这一变化趋势与干摩擦磨损时的情况一致,但相比之下边界润滑状态的摩擦系数较小,仅为干摩擦时的 30%~50%^[10]。

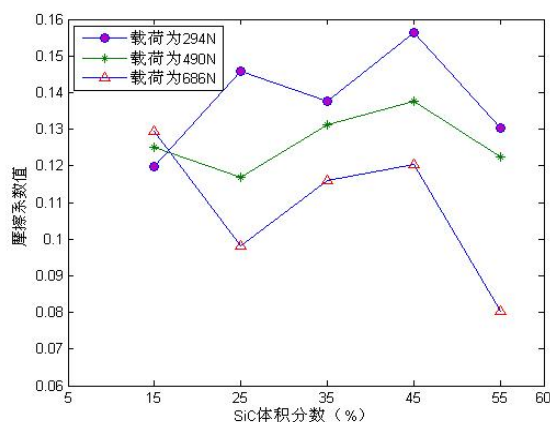


Figure1. The friction coefficient as a function of SiC particle volume fraction and loads

图 1. 不同载荷、不同颗粒体份时的 SiCp/Al 复合材料摩擦系数

在不同载荷条件下, SiC 颗粒体积分数对摩擦系数的影响规律基本上是一致的,但完全不同于干摩擦磨损时摩擦系数随 SiC 颗粒体份增加而单调上升的情况^[10],两者之间并不存在简单的关系。就总体趋势而言,在 25%~45%的体份范围内,摩擦系数基本是随 SiC 颗粒体积分数的提高而增加,而体份超过 45%后摩擦系数显著降低。换言之,45%成为摩擦系数由逐渐升高转向陡降的 SiC 颗粒体积分数拐点。经实验观察发现,这一摩擦系数变化规律与在摩擦接触表面之间形成的边界膜的面积随着 SiC 颗粒体积分数的变化规律吻合。边界膜的存在能有效地阻止对磨件与基体的直接接触,改善了磨面的直接接触,使得 SiC 破碎剥落的几率降低,故而边界膜面积的大小对复合材料摩擦系数能够产生直接的影响。

3.2 边界润滑状态下的材料磨损量及其分析

本文主要研究了在 SiCp/Al 复合材料块与 GCr15 钢环边界润滑状态下对磨时,不同载荷、不同滑动速度以及不同的材料特性(即不同的 SiC 颗粒粒度和 SiC 颗粒体积分数)对磨损量的影响。本文所发现的影响

规律可以概括为:与载荷及 SiC 颗粒体积分数对磨损量的显著影响相比, SiC 颗粒粒度及滑动速度对磨损量的影响都较小。

图 2 为 SiC 颗粒平均尺寸 110 μ m、速度 0.84m/s 时,在不同载荷(294N、490N、686N)下, SiC 颗粒体积分数对磨损量的影响关系图。从图 2 可以看出,相同 SiC 颗粒体积分数下随着载荷的增加,磨损量增大;在各种载荷下,不同 SiC 颗粒体积分数对磨损量的影响规律一致,说明在这三种载荷下,磨损机理没有发生任何变化;在高的 SiC 颗粒体积分数下,载荷对磨损量的影响越来越小。

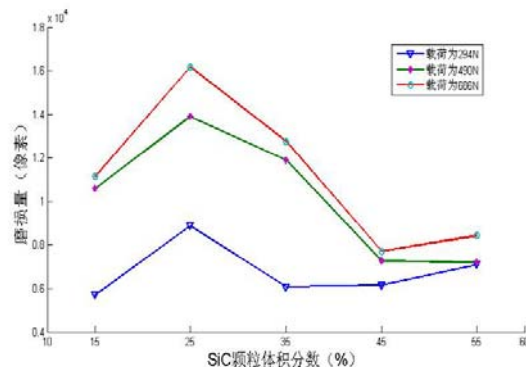


Figure2. The wear rate of the composites as a function of SiC particle volume fraction and loads

图 2. 不同载荷、不同颗粒体份时的 SiCp/Al 复合材料磨损量

从图 2 中可知,磨损量在 25%左右最大,这与干磨损时磨损量随 SiC 颗粒体积分数的增加单调、逐渐下降的结果截然不同^[10]。图 2 所示变化规律的出现可能是在边界润滑条件下,润滑油填充颗粒脱落产生的孔洞形成的良好的边界膜、粘着磨损和磨粒磨损三种作用共同交互影响的结果。一般来说 SiC 颗粒体积分数的增加会对铝基复合材料产生两方面的影响,一方面可以提高复合材料的整体硬度,从而提高铝基复合材料耐磨性,另一方面,随着 SiC 颗粒的增加,会使铝基复合材料抵抗塑性变形的能力降低,从而降低了复合材料抵抗表层、亚表层剥落的能力。随着颗粒体积分数的增加,铝基复合材料中的 SiC-Al 界面面积显著增加,而这些地方往往是裂纹发源地。在一定的载荷下,裂纹容易在相界面、亚表面上形成和扩展,在反复摩擦刮伤过程中容易造成材料的剥落以及颗粒的脱落,使得磨损量逐渐上升、耐磨性降低。在边界润滑下, SiC 体积分数的增加不仅使整体硬度提高使复合材料的耐磨性提高,同时,因亚表层的剥落和颗粒破碎后部分脱落或颗粒整体的脱落形成的孔洞,不可

避免的增加了材料表面的孔隙,增加了摩擦面的储油量,这样,边界润滑膜较完整的附在摩擦表面。另外,在一定的载荷下,对摩件上的部分元素转移到复合材料上形成富铁的坚实的机械混合层,这对提高耐磨性有利。图3给出了SiC颗粒的平均尺寸为110 μm 、体积分数为55%、滑动速度0.84m/s、载荷水平686N时的SiCp/Al复合材料磨损表面形貌。在图3所对应的条件下,随着SiC颗粒的数量增多,复合材料的整体硬度提高、颗粒平均承受的载荷减小、颗粒脱落后润滑油储油面积及其形成的油膜面积增大。这三种作用的加强,提高了SiCp/Al复合材料的耐磨性。

图4为SiC颗粒平均尺寸110 μm 、载荷490N时,在不同速度下(0.42m/s、0.84m/s),SiC颗粒体积分数对磨损量的影响关系图。图5为载荷686N、速度0.84m/s时,在不同的SiC颗粒平均尺寸(110 μm 、63 μm)情况下,SiC颗粒体积分数对磨损量的影响关系图。从图4可以看出,滑动速度大的磨损量高于滑动速度低的磨损量;一般情况下,往复滑动的平均速度将引起表面层发生热变形,化学变化等,从而可以较明显的影响摩擦系数和磨损量。在边界润滑下,滑动速度主要是通过改变边界膜的性质来影响磨损量。往复滑动平均速度对于边界磨损的影响是两个方面的,在速度较低的区域,增加滑动速度对于改变表面的润滑较明显,随着速度的上升,摩擦表面的温度也会随之上升的很快,当表面温度高到足以使润滑膜软化或熔化时,组成边界膜的烃类、醇类和脂肪酸类的边界润滑性质会逐渐消失。因此速度引起表面温度上升的效应对于不含添加剂的油品尤其明显;在本实验中,使用的润滑剂为机油30#,不含其它添加剂,因此高速下磨损量大于低速下的磨损量。

从图5中可以看出颗粒度越大越不利于复合材料的耐磨;这可能是跟不同粒度的SiC颗粒在磨损表面的分形特性有关;铝基复合材料中,SiC颗粒破碎和脱落后,增加了材料表面的孔隙,这样也就增加了磨损表面的储油量,扩大了边界膜面积使磨损表面在摩擦过程中保持比较完整的油膜;颗粒度为63 μm 的复合材料,颗粒镶嵌较浅,易于脱落,之后被润滑油及时填充,形成良好的润滑油膜从而阻止了材料的进一步磨损。故在SiC颗粒粒度为63 μm 的铝基复合材料的耐磨性优于SiC颗粒粒度为110 μm 的。

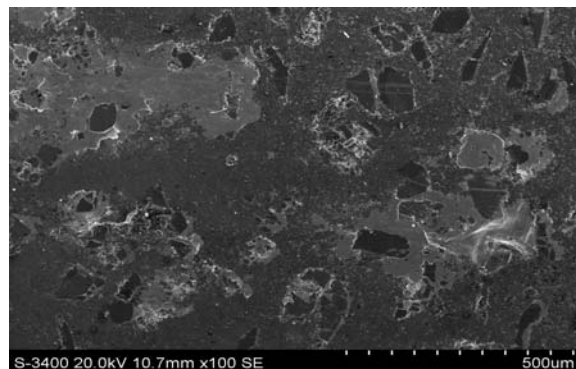


Figure3. SEM photographs of worn surface of Vol.55%-SiCp/Al composites

图3. 体份55%的SiCp/Al复合材料磨损表面形貌SEM图

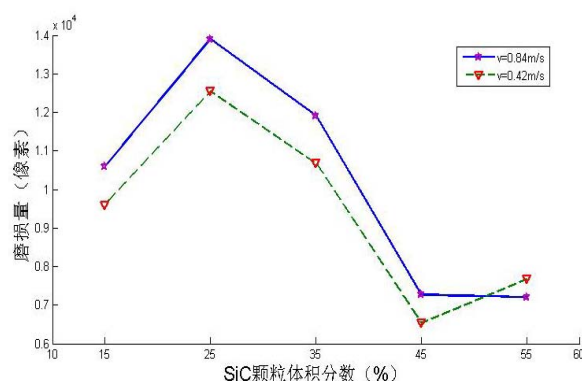


Figure4. Wear rate of SiCp/Al composites vs. volume fraction of SiC particle and sliding speed

图4. 不同速度下的磨损量与SiC颗粒体份关系图

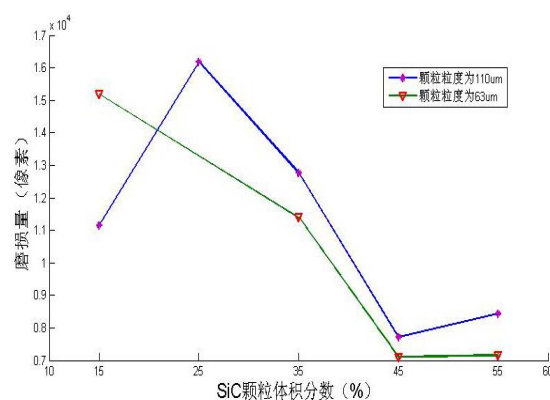


Figure5. Wear rate of SiCp/Al composites vs. volume fraction and size of SiC particle

图5. 不同粒度下的磨损量与SiC颗粒体份关系图

4 结论

(1) 本文给出了边界润滑状态下载荷、速度、SiC颗粒尺寸及体积分数对SiCp/Al复合材料摩擦系数和磨

损量的影响规律, 即随载荷加大, 磨损量增大、摩擦系数减小; 滑动速度越高磨损量越大; 45%的 SiC 颗粒体份是摩擦系数由升高到降低的转折点, 磨损量在 25%的体份时较大、45-55%时较小, 这主要与边界膜的面积及其良好程度有关; SiC 颗粒越小越耐磨, 这主要与摩擦表面的分形特性有关, 颗粒度小的形成的分形表面有利于边界膜的保护作用。

(2) 综合考量, 在边界润滑状态下, 55%的 SiCp/Al 复合材料同时兼具较低的摩擦系数和较高的耐磨性, 作为既减摩又耐磨的零部件具有较好的应用前景, 如用作卫星光机系统的传动轴可实现减重 60%以上、平均谐振频率提高约 70%, 且尺寸稳定性更好。

References (参考文献)

- [1] ALPAS A T and ZHANG J. Effect of SiC particulate reinforcement on the dry sliding wear of aluminium – silicon alloys (A356) [J]. *Wear*, 1992, 155: 83-104.
- [2] MA Z Y, LIANG Y N and ZHANG Y Z. Sliding wear of behaviour of SiC particle reinforced 2024 aluminium alloy composites [J]. *Materials Science and Technology*, 1996, 12: 751-756.
- [3] NAKANISHI H, KAKIHARA K, NAKAYAMA A. Development of aluminum metal matrix composite (Al-MMC) brake rotor and pad [J]. *JSAE Review*, 2002, 23: 365-370.
- [4] VENKATARAMAN B, SUNDARARAJAN G. The sliding wear behaviour of Al-SiC particulate composites macrobehaviour [J]. *Acta Materials*, 1996, 44(2): 451-460.
- [5] MA T, YAMAURA H, KOSS D A, et al. Dry sliding wear behavior of cast SiC-reinforced Al MMCs [J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, A360: 116-125.
- [6] ACILAR M, GUL F. Effect of the applied load, sliding distance and oxidation on the dry sliding wear behaviour of Al-10Si/SiCp composites produced vacuum infiltration technique [J]. *Materials & Design*, 2004, 25: 209-217.
- [7] RAVIKIRAN A, SURAPPA M K. Effect of sliding speed on wear behavior of A356 Al-30wt.% SiCp MMC [J]. *Wear*, 1997, 206: 33-38.
- [8] KORKUT M H. Effect of particulate reinforcement on wear behavior of aluminum matrix composites [J]. *Materials Science and Technology*, 2004, 20: 73-81.
- [9] SANNINO A P, RACK H J. Dry sliding wear of discontinuously reinforced aluminum composites: review and discussion [J]. *Wear*, 1995, 189: 1-19.
- [10] LV Yizhong, WANG Baoshun, CUI Yan, et al. The Friction and Wear Behavior of SiCp/Al Composites Dry Sliding Against GCr15 Steel [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2008, 28(3): 87-91. (in Chinese)
吕一中, 王宝顺, 崔岩, 等. SiCp/Al 复合材料-GCr15 钢干摩擦磨损行为研究 [J]. *航空材料学报*, 2008, 28 (3): 87-91.