

氧化铝短纤维、石墨混杂增强 ZL108 复合材料的摩擦特性*

东南大学 马爱斌 王 明 蒋建清 舒光冀

采用挤压铸造法制备了氧化铝短纤维 (80% $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 20\% \text{SiO}_2$)、石墨 (Gr) 混杂增强铝基复合材料。对其组织、强度、摩擦磨损特性等进行了研究。发现由氧化铝短纤维和石墨混杂增强的铝基复合材料具有优良的摩擦性能。这种复合材料随着其中石墨含量的增加, 摩擦系数明显降低。在短纤维含量较高的铝基复合材料中, 石墨的作用尤为突出。在大载荷下, 石墨能显著降低短纤维增强铝基复合材料的摩擦系数和磨损量。从实验和分析来看, 石墨改变了复合材料的磨损类型。

关键词: 氧化铝短纤维, 石墨, 混杂增强, 铝基复合材料, 摩擦性能

The Friction and Wear Properties of Short Fibre $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Gr}$ Particulate Hybrid ZL108 Composites

Ma Aibing Wang Ming Jiang Jianqing Shu Guangji
(Southeast University, Nanjing 210018 CHINA)

Short fibre alumina (80% $\text{Al}_2\text{O}_3 + 20\% \text{SiO}_2$) /Gr particulate reinforced Aluminium composites were fabricated by the squeeze infiltration process. The microstructure, tensile behavior, friction and wear properties of this type of composites was investigated. It was shown that the friction properties of this type of composites were superior. The more the volume fraction of graphite is, the lower the frictional coefficient is. With the increasing of the volume fraction of short fibre alumina, the effect of particulate Gr becomes more and more evident. Under larger wear stress, the friction coefficient and wear rate of this type of composites were decreased greatly by adding Gr particulate. According to the experiments and analysis, the wear mechanism of composite was varied by Gr.

Key words: Short fiber alumina, Graphite, Hybrid reinforced, Aluminium matrix composites, Friction and wear properties

一、前 言

铝基复合材料是当前发展最为迅速、应用最为广泛的一类金属基复合材料。由于用非连续增强体增强的铝基复合材料性能上各向同性, 制备工艺简便, 成本较低, 在民用工业和军事工业的实用性都较强, 因而成为各国重点发展的金属基复合材料^[1,2]。作为非连续增强体的材料有 SiC 、 Si_3N_4 晶须, Al_2O_3 、合成 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 短纤维, 以及 SiC 、石墨颗粒等。在非连续体增强铝基复合材料方面, 近年来, 我国也进行了很多研究工作^[3,4]。

复合材料的特点是, 它不仅能保持原组成的特性, 而且可通过选择不同增强体, 获得原组成不具有的性能。混杂复合材料可以兼顾两种或多种复合材料的特点, 使

材料的设计自由度和应用范围进一步拓宽^[5]。本文对氧化铝短纤维和石墨混杂增强 ZL108 复合材料的摩擦磨损特性进行了研究。

二、实验方法

采用挤压铸造法制得不同纤维含量、不同石墨含量的混杂增强 ZL108 复合材料。制备过程如图 1 所示。 Al_2O_3 短纤维的百分含量有 (V_f) 8%、12% 和 20%; 石墨的含量有 (V_{Gr}) 1%、2% 和 4%。纤维和石墨的混杂配合见表 1。

把氧化铝短纤维和石墨按表 1 制备预制块, 把预制块加热到 800℃, 放入金属模, 然后浇注铝合金液, 在 100MPa 压力下使其进入预制块内, 制得试验用复合材料。

* 本课题为国家自然科学基金资助项目

表 1 复合材料中纤维和石墨的含量 (%)

纤维 \ 石墨	0	1	2	4
0	ZL108	×	×	×
8	▲	▲	▲	▲
12	●	●	●	●
20	○	×	○	○

注：▲、●、○均为本试验用复合材料

×表示本试验没有制备该材料

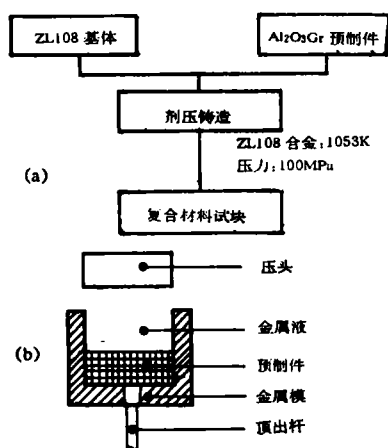
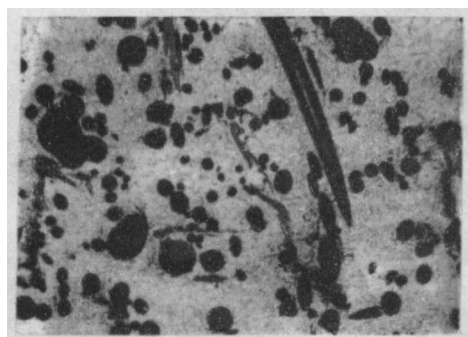


图 1 复合材料制备过程示意图

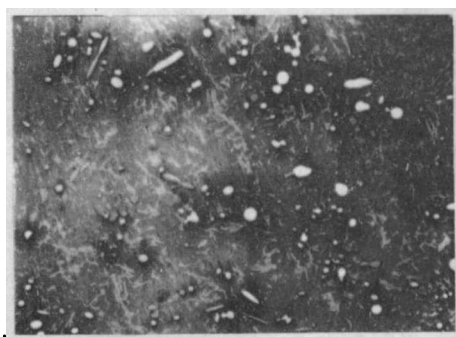
(a) 复合材料制备工艺流程；

(b) 挤压过程示意图

把复合材料加工成标准试样，测得复合材料拉伸强度和摩擦磨损性能。所有试验均重复 3 次。



(a) 纤维和石墨分布 (V_f : 20%、 V_{Gr} 4%) $\times 350$



(b) 不含石墨复合材料中纤维分布 (V_f 8%) $\times 150$

图 3 复合材料中短纤维和石墨分布

2. 复合材料静态力学性能

表 2 为复合材料布氏硬度值。从表中可以看到，短纤维含量越高，复合材料硬度越高。而石墨对硬度的影响不大。

图 4 为复合材料常温拉伸强度。从图中可看到，石墨含量较低时，随着短纤维含量增加，拉伸强度略有降低；

材料工程

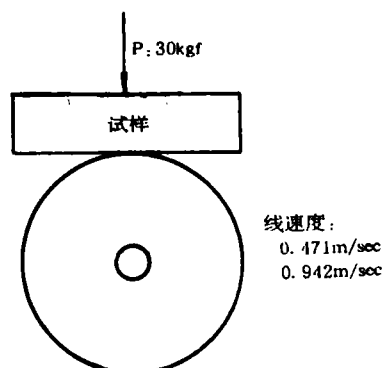


图 2 摩擦磨损试验示意图

摩擦磨损试验如图 2 所示。试验条件为：干摩擦；载荷 30kgf；对偶件线速度 0.942m/sec. 和 0.471m/sec.，对偶件材料为高速钢（表面硬度 HRC60），空气相对湿度 87%；摩擦过程表面温度大约为 80℃。测试时间 15min。试验后测定材料的摩擦系数 μ 和磨损量 ΔV ，并对试样的摩擦磨损进行扫描电镜观察和分析。

三、试验结果和讨论

1. 短纤维和石墨分布观察

图 3 为复合材料中短纤维和石墨的分布状态。图 3 (a) 为混杂增强复合材料金相，其中灰度较浅的条状组织为石墨，其它圆状或针状组织为氧化铝短纤维。图 3 (b) 为不含石墨的 Al₂O₃ 短纤维增强 ZL108 复合材料中短纤维分布。从图中可看到，石墨和短纤维在复合材料中的分布都比较均匀。

而石墨含量较高时，增加纤维含量则拉伸强度有所提高。从总体看，加入石墨其复合材料拉伸强度略有降低。

3. 复合材料的摩擦磨损性能

图 5 为该复合材料的摩擦系数受 Al₂O₃ 短纤维和石墨影响的关系图。从图中可看到，在 Al₂O₃ 短纤维增强复合材料中加入石墨，可以降低复合材料的摩擦系数 μ 。在

表 2 复合材料布氏硬度值

HB \ V _f , %	V _{Gr} , %			
	0	1	2	4
0	95	—	—	—
8	121	119	115	110
12	144	140	140	135
20	158	—	152	148

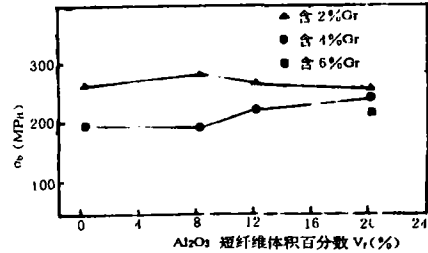
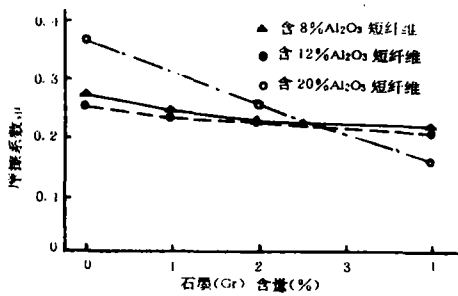
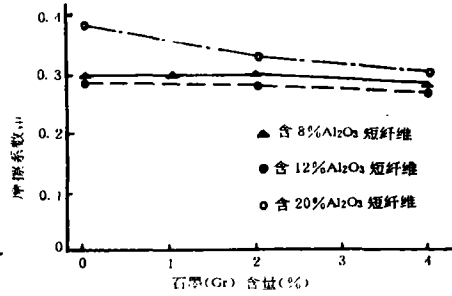


图 4 复合材料常温拉伸强度



(a) 线速度为 0.942m/sec



(b) 线速度为 0.471m/sec

图 5 氧化铝短纤维和石墨对铝基复合材料摩擦系数的影响

短纤维含量较低时，石墨增加，对复合材料摩擦系数的影响较小。而在短纤维含量较高（如图 5 (a) 中 V_f 为 20%）时，石墨的影响则较为显著，会大大降低复合材料的摩擦系数。从不同线速度对摩擦性能的影响可以看到，线速度越大，复合材料摩擦系数越小，石墨的作用也越明显。

图 6 为氧化铝短纤维和石墨对复合材料磨损量 ΔV 的影响图。从图看到，在短纤维含量为 8% 时，加入少量石墨，减小了复合材料的磨损量；但继续增加石墨含量，复合材料的磨损量有所增加。在氧化铝短纤维含量为 12% 和 20% 时，加入石墨可显著降低复合材料磨损量；但石墨含量超过 2% 以后，降低趋势却有所减弱。

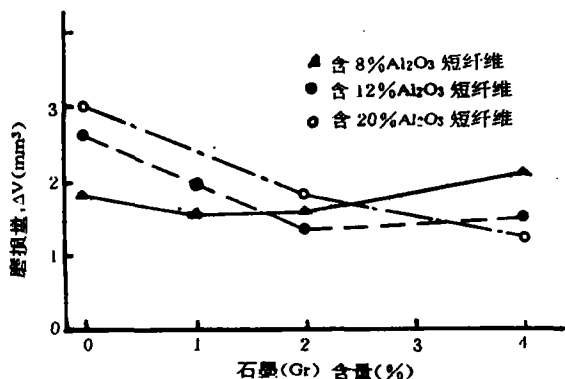


图 6 短纤维、石墨对复合材料磨损量影响

从图 6 也可看到，在不含石墨的情况下，纤维量增

加，复合材料磨损量也增加。这是由于本文所采用的摩擦试验载荷较大；再者，氧化铝短纤维在基体中没有完全控制方向，因此在较大载荷作用下，有些不利走向的短纤维可能被剥落或拔出，造成磨粒磨损，从而引起磨损量的增加。短纤维含量越高，磨粒磨损的机会也越多。

4. 复合材料摩擦磨损机理分析

从上述试验结果可以看到，氧化铝短纤维和石墨混杂增强的铝基复合材料具有较良好的摩擦磨损性能。短纤维和石墨的适当配合，可使复合材料具有较低的摩擦系数和较小的磨损量。在对偶线速度较高的情况下，两者的混杂效果更为明显。

本试验采用的氧化铝短纤维实际上是含 80% Al₂O₃ 和 20% SiO₂ 的合成晶体纤维。结构为莫来石和少量尖晶石。它具有很高的硬度。在复合材料中，这些纤维成为硬质点，使复合材料不易磨损。在摩擦磨损试验中，两种材料的接触如图 7 所示。宏观上平滑的表面实际上是凹凸不平的，面的接触实际上是若干点的接触。由于 Al₂O₃ 短纤维不易磨损，一段时间后，存在于复合材料接触表面的短纤维将成为摩擦磨损的接触点。从图 5 可看到，在没有石墨存在时，复合材料的摩擦系数 μ 随纤维含量的增加而升高很快。由摩擦力 f 与摩擦系数 μ 和正压力 P 的关系式 f = μP 可知，在 P 较大的情况下，f 随 μ 的变化比较大。作用在接触表面的摩擦力 f 实际上就是引起纤维剥落的剪切力。如果 f 大于短纤维和基体的界面结合力，短纤维可能被从基体中剥落出来。实际上，处于复合材料接触表面的那些走向和外力方向垂直的短纤维，在与摩擦力 f 相反的方向上结合力比较弱，所以极有

可能被从基体中剥落出来，而成为磨粒。在纤维含量较高的情况下，这种可能性更大，机会更多，最终使复合材料成为磨粒磨损。

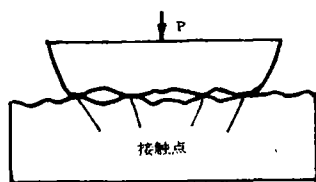


图7 在外力下，两种材料接触的示意图

石墨是工业上经常采用的固体润滑剂。它具有稳定而明显的六方晶体结构，呈鳞片状，如图8所示。其同一层内碳原子由共价键相连，结合力弱。所以，在平行于薄层的方向上剪切强度很低。石墨滑动时的摩擦系数在0.05~0.19之间^[6]。由于石墨具有以上特性，当其加入到复合材料以后，显著降低复合材料的摩擦系数，而使得在复合材料接触表面产生的摩擦力 f 大大降低。如果 f 小于短纤维和基体的结合力，短纤维将不会脱离基体成为磨粒。图9为试样摩擦磨损表面层内形成的裂纹以及裂纹顶端纤维的形貌。裂纹由磨损表面的短纤维处一直延伸至内部40 μm 左右。虽然纤维侧面产生了裂纹，并且这种走向的纤维就是前面所述的最易剥落的纤维，

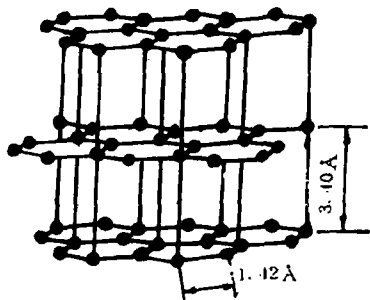


图8 石墨的晶体结构模型

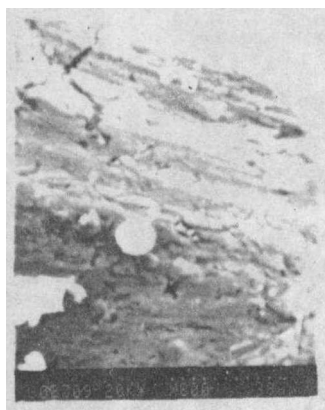


图9 复合材料磨损表面层内裂纹及裂纹顶端纤维形貌 (Vr12%, Vgr2%)

但它并没有从基体中脱落。由此可见，石墨是起到了很好的润滑作用的。

图10是复合材料试样经研磨抛光后表面短纤维和石墨形貌的电镜观察结果。从图中可以看到，短纤维多半凸出于试样表面，在磨损过程中起到了抗磨作用。而石墨已大多从基体中剥落出来，在摩擦磨损试验中起到固体润滑剂的作用。

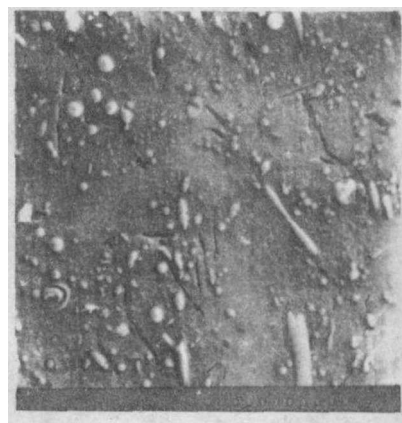


图10 摩擦试验中纤维和石墨形貌观察 (Vr20%, Vgr4%)

四、结 论

1. 随着石墨含量的增加，复合材料的摩擦系数有明显降低。滑动线速度高，降低趋势显著。
2. 短纤维含量越高，石墨作用越显著。在高纤维复合材料中，石墨能显著降低复合材料的摩擦系数和磨损量。
3. 在氧化铝含量较高的铝基复合材料中，混杂石墨可以改变复合材料的磨损类型，减小磨粒磨损的可能性。

致 谢

本文得到东南大学分析测试中心黄海波、赵华庭、张谨平等同志，以及赵贵鸿同志的大力帮助，在此表示衷心感谢！

参 考 文 献

1. 于琨等，材料科学与工程，1989，(7)，12
2. 藤田米章，铁工钢，1989，(9)，1516
3. 马宗义等，材料科学与工程1990，(3)，24
4. 林志刚等，金属科学与工艺，1992，(11)，45
5. 吴人洁，第五届全国复合材料会议报告论文1988
6. 籍国宝等，摩擦磨损原理，1984
7. Friend CM et al., J Mat Sci., 1988，(23)，1967
8. Friend CM et al., 1, ICCM-VI, 1989，402