

[文章编号] 1004-0609(2000)03-0395-05

用单摆划痕法研究 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ 合金在不同 冲击速度下的磨损行为^①

白晓军, 沙江波, 朱和祥, 匡同春, 黎祚坚, 曾 强

(广东工业大学 材料科学与工程系, 广州 510090)

[摘 要] 为揭示 MMCs 材料的冲击磨损机理, 采用单摆划痕法对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ 合金耐冲击磨损行为进行了研究, 结果表明: (1) 在 3 m/s 冲击速度下, 随着增强相的体积分数增多, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ 合金抗冲击磨损性降低。在 4 m/s 冲击速度下, 20% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ 合金具有最高的抗冲击磨损性, 而 25% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ 合金的抗冲击磨损性最弱。对同一种 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ 合金材料, 冲击速度为 4 m/s 时的耐冲击磨损性优于速度为 3 m/s 时的耐冲击磨损性。(2) 在冲击磨损过程中, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ 合金表面出现严重的犁沟和伴随发生的 Al_2O_3 短纤维被拉出基体形成空位的现象。

[关键词] 冲击磨损; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ 合金; 速度效应; 划痕试验

[中图分类号] TG115.5⁺ 8

[文献标识码] A

对于像发动机活塞、刹车盘等耐摩擦件, 其运动的开始、结束及不同的运动速度都具有明显的动态特征, 一般的耐磨性实验(如砂轮磨损试验)不能揭示其真实的磨损行为。本文采用带冲击能量的划头划过材料表面来模拟真实冲击磨损过程^[1~4], 用划头的能量消耗来描述材料的动态磨损行为。结果显示, 单摆划痕法是研究冲击磨损的一种简单、实用的技术。

在抗磨损领域, MMCs(金属基复合材料)是一种理想的耐磨材料, 有着广泛的应用前景。对 MMCs 材料的摩擦系数、失重率以及磨损机理等方面的研究指出, 增强相的加入大大提高了基体的耐磨性能, 这种影响与增强相的百分含量、分布、大小、以及种类有关^[5~10]。

近年来, 科技工作者已认识到动态磨损特征描述的重要性^[1~4], 本文采用单摆划痕法在不同冲击速度下研究和测量 Al_2O_3 粒子增强 Al 合金基复合材料的比能耗、动态硬度以及表面划痕特征, 得出 MMCs 的冲击磨损性能明显优于基体材料, 弄清了 MMCs 材料的磨损机理。

1 实验

1.1 材料和样品

基体为 Al-9% (质量分数) Si, 分别用含量为

10%, 20%, 25% (体积分数) 的 Al_2O_3 短纤维作增强材料, 短纤维平均长度、直径分别为 20~100 μm 和 6~20 μm , 经压铸和 T6 处理(515 $^{\circ}\text{C}$ 下处理 4 h, 水冷, 在 205 $^{\circ}\text{C}$ 下时效 6 h)后, 机加工成 40 mm $\times$ 5 mm $\times$ 3 mm 的块状样品, 用 800# 的砂纸打磨试样表面。

1.2 实验参数和装置

图 1 为由普通冲击试验机改装成的单摆划痕试验仪, 摆锤和垂线的初始夹角可决定金刚石划头与试样表面接触时的冲击速度。摆臂的长度为 77 mm, 冲击速度为 3 m/s 和 4 m/s 时相应的初始夹角分别为 90 $^{\circ}$ 和 130 $^{\circ}$ 。当摆锤从选定的初始夹角释放后, 划头划过试样表面并留下弧型的凹槽, 记录槽的长度 L 以及能耗 E 。定义能耗 E 与材料磨损体积 V 的比率为比能耗 e ($e = E/V$)。调整样品台的高度可改变划头与试样表面的距离, 这样可获得一系列的划痕长度和能耗值。通常这些数据决定了临界比能耗 e 的大小。参考资料[3~7]中介绍了测量和计算 e 和 V 的详细方法。通过 SEM 可观察材料表面划痕。

2 结果和讨论

2.1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ 的显微组织

经过压铸后, Al_2O_3 短纤维的取向趋向于与压

① [基金项目] 广东省自然科学基金资助项目(960094)

[收稿日期] 1999-05-18; [修订日期] 1999-11-28

[作者简介] 白晓军(1956-), 男, 博士。

力方向垂直, 图 2 为 20% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ 两相互垂直平面的显微照片。在图 2(a) 中(划痕表面), 大多数的 Al_2O_3 垂直于压力方向且均匀分布在基体中, 而在图 2(b) 中, 大部分 Al_2O_3 显示了其径向截面。

2.2 HB 硬度测量

经 T6 技术处理的 MMCs, 增强相明显地增加了基体的硬度, 见图 3, HB 硬度随 Al_2O_3 体积分含量的增高而呈直线上升。

2.3 临界比能耗 e_c 的确定

对于不同的材料和冲击速度, 比能耗是一个变量。但它随着磨损量的改变, 将会达到一个定值, 即临界比能耗 e_c 。表 1 为以 4 m/s 速度冲击 10% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ 的能耗 E 、槽沟长度 L 、磨损体积

V 、比能耗 e 的原始数据。其中 $V = 0.53 L A_t$, A_t 为沟槽最大横截面积^[5]。明显可见 E 值随磨损量的增加而增大。但是单位质量的能耗却下降。图 4 为 e 和 V 的关系曲线, 从图中可直观地看出, 在 1.72 J/mm³ 时 e 达到一个相对稳定的值, 这就是临界比能耗。

2.4 冲击速度对冲击磨损行为的影响

图 5 为在冲击速度分别为 3 m/s 和 4 m/s 的情况下各种材料的 e_c 。随着磨损体积的增加, 耐冲击磨损性下降。在 3 m/s 的冲击速度下, 复合材料随着短纤维的体积分含量增大, 抗冲击磨损性降低。在 4 m/s 的冲击速度下, 20% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ 最大耐磨损值可达 2 J/mm³; 而在 3 m/s 的冲击速度下, 25%

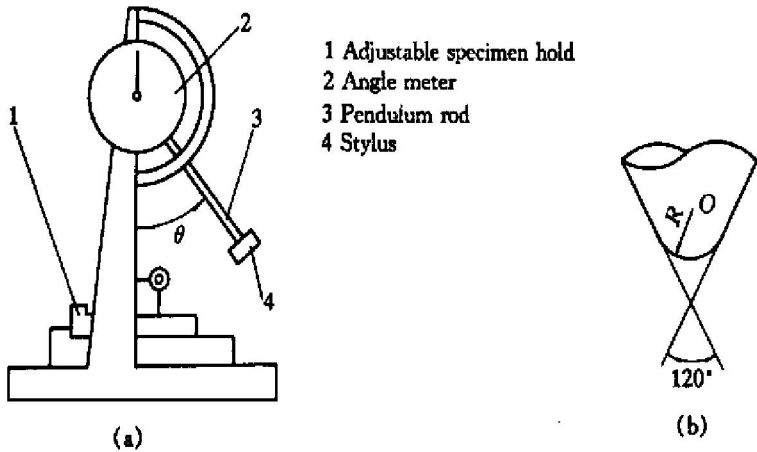


图 1 单摆划痕法装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single pendulum scratch device
(a) —Apparatus; (b) —Top view of diamond stylus

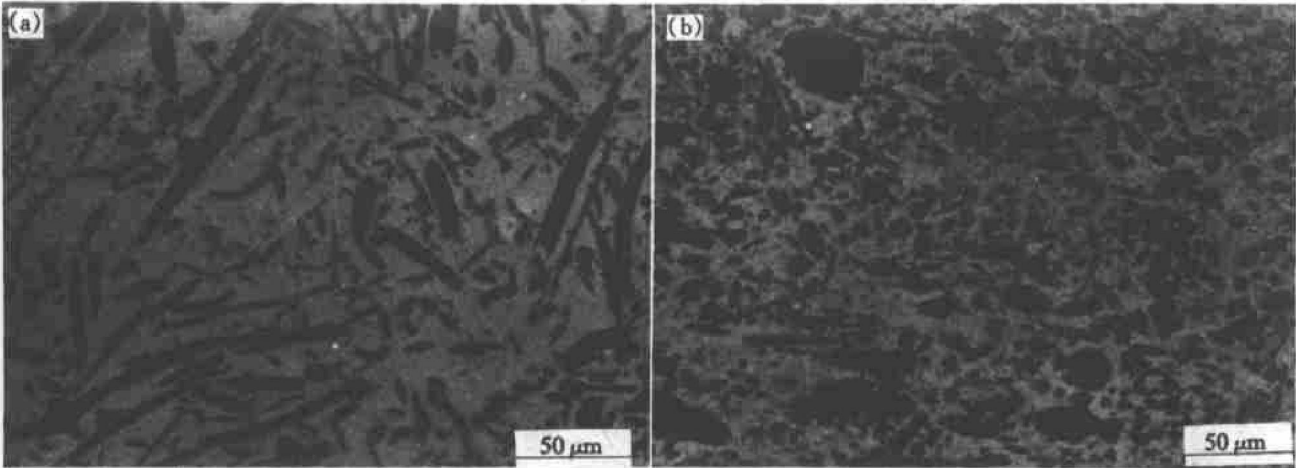


图 2 20% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ 的显微组织照片

Fig. 2 Photographs of microstructure in 20% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$
(a) —Section of perpendicular to squeezing direction;
(b) —Section through squeezing direction

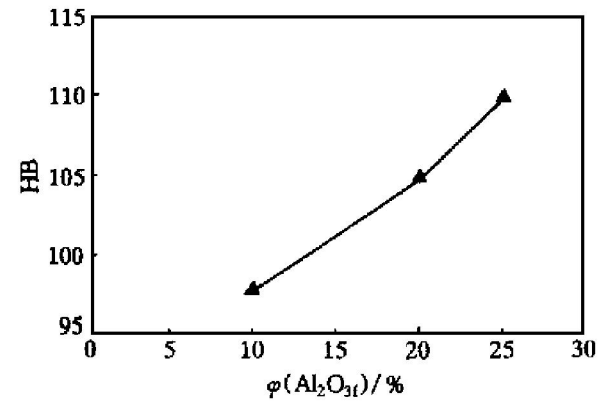


图 3 硬度与 Al_2O_3 体积分量的关系

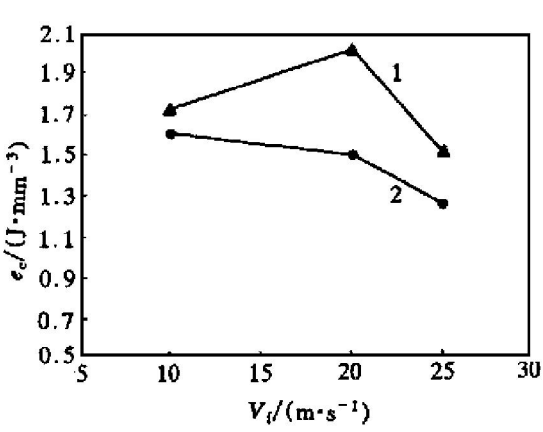


图 5 冲击速度与临界比能耗的关系

Fig. 3 Hardness vs volume fraction of Al_2O_3

Fig. 5 Variations of critical specific energy e_c vs impact speed (v)

表 1 能耗值和划槽的大小

Table 1 Data of energy consumption and size of scratch groove

No.	E/J	L/mm	V/mm^3	$e/(\text{J}\cdot\text{mm}^{-3})$
1	3.25	30.6	1.862	1.71
2	0.687	36	3.885	1.73
3	0.212	25	0.627	3.32
4	13.25	41	7.44	1.74
5	4.0	31	1.841	2.13
6	3.5	29	1.313	2.61
7	4.75	31	1.841	2.53
8	3	27	0.921	3.19

1— $v=4\text{ m/s}$; 2— $v=3\text{ m/s}$

示了划痕表面局部形貌,在基体两侧的碎片随 Al_2O_3 短纤维一同被拉出,图 6(b) 中沟槽平滑的底部表明存在着典型的切削过程。从图 6(c)、图 6(d) 可看到短纤维增强相 Al_2O_3 被单独或与基体材料一同拉出,所以基体中留下一些空位。但由于空位密度小于增强相密度,和颗粒增强一样只有部分的 Al_2O_3 和基体一同被破坏^[11,12]。由于基体材料无增强相,所以其磨损时无明显的空位。这就是 MMCs 和基体材料在摩擦机理方面的主要区别^[11,12]。

根据 Archard 定律可知,复合材料的耐磨性优于合金基体材料,且随着增强相的增多耐磨性提高。然而,由于机械和冶金方面的原因,结果有所不同。

在机械方面,冲击和磨损是冲击磨损的两个重要特征。当划头划过表面时,就如机械切削过程会遇到前、左、右三向阻力造成变形、挤压、剪切断裂,采用准静态法测量的硬度不能描述实际材料的动态磨损行为。冲击磨损具有塑性变形、剪切断裂、以及短纤维被拉出基体等特征(如图 6),所以材料的韧性、强度、延伸率以及增强相与基体的接触状态等因素对冲击磨损影响较大,而硬度不是主要因素。

在冶金方面,由于增强相降低了材料的塑性、韧性以及受冶金方法的影响,基体吸收冲击能量的能力降低,但从基体中拉出增强相也能消耗冲击能,当后者作用大于前者时,冲击磨损将会得到改善,这就要求材料表面的增强相分布均匀。另外,冲击会使材料变脆,即当冲击速度增大,材料的强度提高,韧性下降。但是对冲击磨损的直接影响因素尚待全面系统研究。

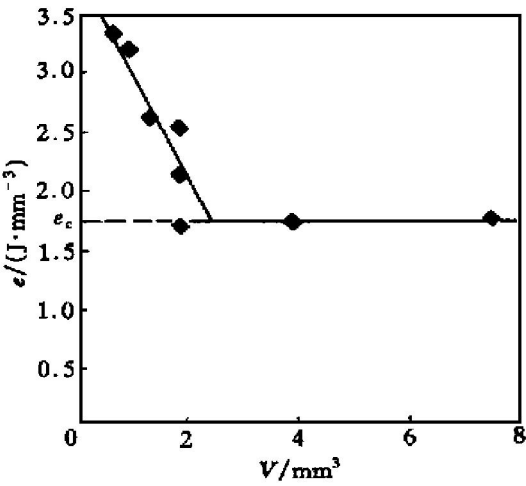


图 4 比能耗 e 和材料磨损体积 V 的关系

Fig. 4 Relationship between specific energy consumption (e) and wear volume of materials (V)

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ 存在最小耐磨损值 1.3 J/mm^3 。在同种材料下,高速冲击的耐磨性优于低速冲击的耐磨性,所以冲击速度对耐冲击磨损性能有显著的影响,这在 2.5 节将会作详细的分析。

2.5 划槽的观察

采用 SEM 来观察样品表面的划痕。图 6(a) 显

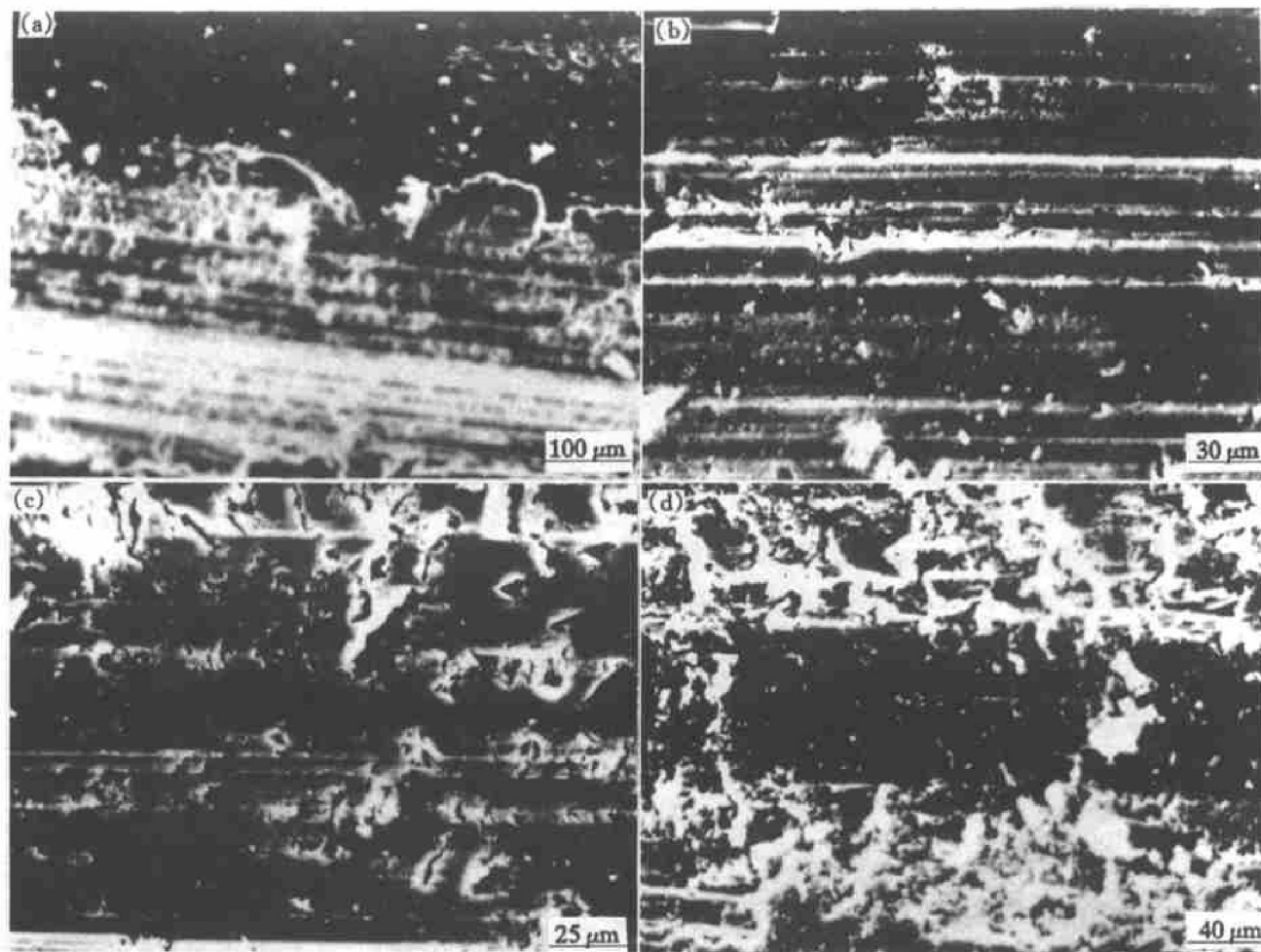


图 6 划痕的 SEM 照片

Fig. 6 SEM photographs of scratched traces

(a) —Scratched groove; (b) —Furrow; (c) —Single void; (d) —Void group

从以上的讨论得知, 当冲击速度、强度、韧性达到最佳组合时, 材料能获得更佳的抗冲击磨损性能。当冲击速度为 3 m/s, 10% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlF}_9\text{Si}$ 达到最佳结合点。而当冲击速度为 4 m/s 时, 20% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlF}_9\text{Si}$ 达到最佳结合点。两者均分别达到最高的抗冲击磨损性。变速冲击对材料磨损行为影响的模型在摩擦学领域尚未建立, 以后将在这方面多做些实验研究工作。

3 结论

1) 当冲击速度为 3 m/s 时, 随着磨损体积的增加, 抗冲击磨损性降低 (e_c 降低)。当冲击速度为 4 m/s 时, 20% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlF}_9\text{Si}$ 具有最好的抗冲击磨损性, 而 25% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlF}_9\text{Si}$ 则达到最低值。在相同材料的情况下, 4 m/s 冲击速度下的抗冲击磨损性能优于 3 m/s 时的。

2) 冲击磨损的主要特征和机制是塑性变形、切削、形成犁沟以及短纤维被拉出基体等。

3) 当材料的强度和韧性达到最佳结合点时, 具有较好的抗冲击磨损性能。

[REFERENCES]

- [1] Vingsbo O and Hogmark S. Single pass pendulum grooving-A technique for abrasive testing [J]. *Wear*, 1984, 100: 489– 502.
- [2] Bryggman U, Hogmark S and Vingsbo O. Mechanisms of gouging abrasive wear of steel investigated with the aid of pendulum single-pass grooving [J]. *Wear*, 1986, 112: 145– 162.
- [3] Bryggman U, Hogmark S and Vingsbo O. Prediction of gouging abrasion resistance of steel by pendulum grooving and other laboratory test methods [J]. *Wear*, 1987, 115: 203– 210.
- [4] Kennsdy F E. *Journal of lubrication technology* [J]. *Transactions of the ASME*, 1982, 104: 582– 588.
- [5] Liang Y N, Li S Z and Li S. Evaluation of abrasability of porous seal materials in a single pendulum scratch device

- [J]. Wear, 1994, 177: 167– 173.
- [6] Liang Y N, Li S Z, Li D F, et al. Some development for single pass pendulum scratching [J]. Wear, 1996, 199: 66– 73.
- [7] Bhan K J and Mehrabian R. J Metals, 1982, 32: 30– 34.
- [8] Roy M, Venkataraman B and Bhanuprasad V V. The effect of discontinuous SiC reinforcement on the sliding wear behaviour of aluminum matrix composites [J]. Metall Tran, 1992, 23A: 2833– 2847.
- [9] Hosking F M, Portillo F F, Wunderlin R, et al. Composites of aluminium alloys: Fabrication and wear behaviour [J]. J Mater Sci, 1982, 17: 477– 498.
- [10] Ma Z Y. Abrasive wear of discontinuous SiC reinforced aluminum alloy composites [J]. Wear, 1991, 148: 287– 293.
- [11] Liang Y N, Ma Z Y, Li S Z, et al. Impact abrasive behavior of $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ composites in single pendulum scratch testing [J]. Wear, 1994, 178: 9– 15.
- [12] Sha J B, Zhu H X, Li Z J, et al. Journal of Experimental Mechanics, 1990, 13(1): 34– 40.

Impact wear behavior and speed effect in $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ MMC tested by single pendulum scratching

BAI Xiao-jun, SHA Jiang-bo, ZHU He-xiang, KUANG Tong-chun, LI Zou-jian, Zeng Qiang
(*Department of Materials Science and Engineering,
Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, P. R. China*)

[Abstract] The impact wear test by single pendulum scratch method is one of the methods for investigating the work and wear performance of the spares under dynamic moving conditions. The impact wear resistance of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ MMC was studied, the resistance to impact wear was found to depend on the impact speed significantly. At an impact speed of 3 m/s, it decreases with the increase of Al_2O_3 fiber volume fraction in the volume fraction range between 10 and 25 percent. The resistance at 4 m/s impact speed maximized at the volume content of 20 percent, though it is higher than that at 3 m/s impact speed for all the studied Al_2O_3 content. SEM studies of the worn surface reveal two concurrent mechanisms, namely the serious plowing and the pull out of the Al_2O_3 short fibers.

[Key words] impact wear; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-9Si}$ MMC; speed effect; scratch tests

(编辑 朱忠国)