

碳化硅颗粒增强铝合金复合材料 冲击磨粒磨损行为的研究*

梁亚南 李诗卓 马宗义 李 曙 毕 敬

(中国科学院金属研究所 沈阳 110015)

杨 生 荣

(中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑开放研究实验室 兰州 730000)

摘 要 为了揭示工程实际中处于动载摩擦工况下对磨件的磨损规律,利用单摆划痕法对 SiC 颗粒增强的 2024Al 复合材料的冲击磨粒磨损行为进行了试验研究.结果表明,在给定的试验条件下,复合材料的抗冲击磨粒磨损能力比 2024Al 基体合金的好,而且是随着颗粒含量的增大而提高,颗粒尺寸越小,复合材料的抗磨粒磨损性能越好;经过热处理强化(500℃下固溶 1 小时,水淬+170℃下时效 5 小时)的复合材料的抗磨性比挤压状态的复合材料的好.复合材料的抗冲击磨粒磨损性能主要取决于材料的力学性能、组织结构和 SiC 颗粒与基体的协调变形程度.

关键词 单摆划痕, SiC 颗粒, 铝合金复合材料, 磨粒磨损

1 前言

颗粒增强铝合金复合材料的比强度和比模量都相当高,在抗磨领域的应用前景广阔^[1,2],人们已对其磨损行为作了许多研究^[3-6].由于材料的磨损性能受磨损条件和环境等因素的综合影响,致使这种研究十分复杂,尤其颗粒增强铝合金复合材料摩擦副(如发动机活塞/缸套)大都是在具有动载摩擦特征条件下工作.但是,以往的研究大多采用载荷恒定的常规试验方法,其结果显然不能准确反映实际工况下的磨损规律,因而有必要在冲击加载条件下对复合材料的磨损行为进行研究.单摆划痕法是近年发展起来的研究材料摩擦磨损行为的试验方法,能够模拟单一磨粒以一定的冲击力划过材料表面的单元过程.这种方法简便省时,可以测量每次划痕过程所消耗的冲击能. Vingsbo 等^[7]、Kennedy 等^[8]和李诗卓等^[9]都已经利用单摆试验机分别对常规材料、封严涂层和薄膜复合材料进行了研究.本文采用单摆划痕法研究 SiC 颗粒增强 2024Al 复合材料的冲击磨粒磨损行为,以揭示在冲击加载条件下,颗粒含量、尺寸及热处理状态与磨损性能的关系.

2 试验部分

2.1 试验材料

采用 2024Al[含 4.20(wt%,下同)Cu、1.47Mg、0.56Mn、0.02Zr、0.40Si 和 0.27Fe]粉

* 国家自然科学基金和中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑开放研究实验室资助项目

1994-12-28 收到初稿, 1995-05-30 收到修改稿

本文通讯联系人梁亚南

末(平均粒径为 $50\ \mu\text{m}$)为基体原料,以粒径为 $3.5\text{--}20.0\ \mu\text{m}$ 的 $\alpha\text{-SiC}$ 颗粒为增强剂,采用粉末冶金法制成复合材料,随后在 $450\ ^\circ\text{C}$ 下按 $20:1$ 的比例进行挤压加工. 大部分材料进行了 T6 强化处理($500\ ^\circ\text{C}$ 固溶 1 小时,水淬+ $170\ ^\circ\text{C}$ 时效 5 小时),少部分材料保持挤压状态,以对比材料处理前后抗磨性的差异. 试样尺寸为 $35\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}$,测试表面用 $800\#$ 砂纸打磨到所需光洁度. 试样材料的组成、热处理条件及其力学性能见表 1 所列.

表 1 试样材料的组成和热处理及其力学性能

Table 1 The composition, heat-treatment and physical properties of specimen materials

Code of specimen	Particle content (vol%)	Particle size (μm)	Heat-treatment state	Tensile strength (MPa)	Hardness HB (MPa)
1	0	0.0	T6	525	802
2	15	3.5	T6	558	891
3	20	3.5	T6	590	925
4	30	3.5	T6	670	975
5	15	10.0	T6	541	884
6	15	20.0	T6	491	872
7	0	0.0	As-extruded	361	581
8	15	3.5	As-extruded	397	701
9	15	10.0	As-extruded	392	689
10	15	20.0	As-extruded	389	723

2.2 试验设备

将普通 PSW-150 型单摆冲击试验机改造成单摆划痕试验机,其结构原理见图 1. 安装在摆锤(4)上的硬质合金(YG6)划头(5)顶端呈圆锥状. 试验时将试样平放于样品台上再调

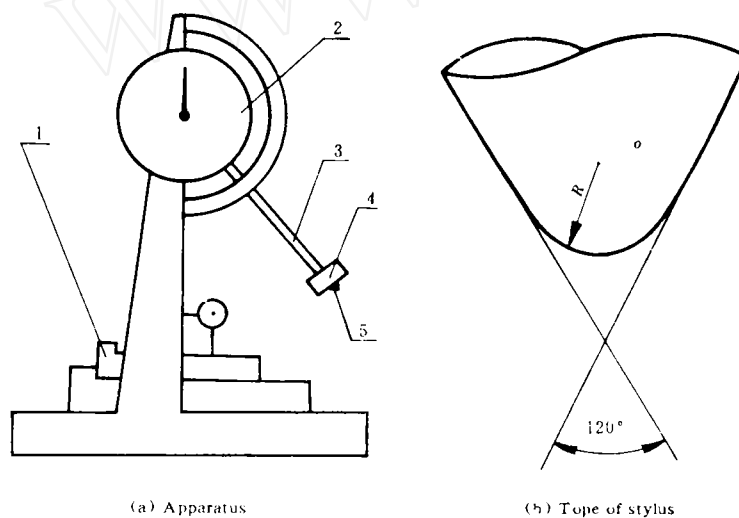


Fig. 1 Schematic diagram of the single pendulum scratch device

1. Adjustable specimen holder, 2. Angle meter, 3. Pendulum, 4. Bob, 5. Stylus.

图 1 单摆划痕试验机结构原理示意图

1. 可以调节的试样夹具, 2. 测角器, 3. 摆杆, 4. 摆锤, 5. 划头.

整到所要求的高度. 从初始位置自由释放摆杆, 划头在试样表面划出一条弧形划痕. 测量划痕前后的摆角差, 可以计算出划痕过程中所消耗的能量. 利用表面形貌仪和读数显微镜($\times 100$)分别测量出划痕的长度(L)及其中部的最大横截面积(A_r), 以估算划痕的体积损失($V = 0.53 L \cdot A_r$), 试验方法详见文献[9]和[10].

试验将初始摆角定为 60° , 入侵速度约为 2.1 m/s . 利用扫描电子显微镜和金相显微镜分别对划痕的表面形貌及其表层剖面组织进行观察.

3 试验结果与分析

研究表明, 单摆划痕试验中消耗的能量(E)与材料耐磨性有很好的对应关系, 因而比能耗(e)是较为理想的耐磨性评价指标^[7]. 所谓比能耗 e 是产生单位划痕体积所消耗的能量, 其表达式为 $e = E/V$. 在同一材料表层由浅到深刻出尺寸不同的划痕, 从而得出一系列的比能耗 e 及与之对应的划痕体积 V , 便可以绘制出 $e-V$ 曲线. 研究发现, 比能耗是随着划痕体积的增大而下降, 当划痕体积达到一定值以后, 比能耗趋于稳定. 因此, 本文以 $e-V$ 曲线稳定阶段的划痕体积 $V = 0.015 \text{ mm}^3$ 所对应的比能耗值, 作为 SiC 颗粒增强铝合金复合材料抗冲击磨粒磨损性能的评价指标.

图2(a)和(b)是经过T6处理的复合材料的比能耗随颗粒含量(V_f)和尺寸(S)变化的

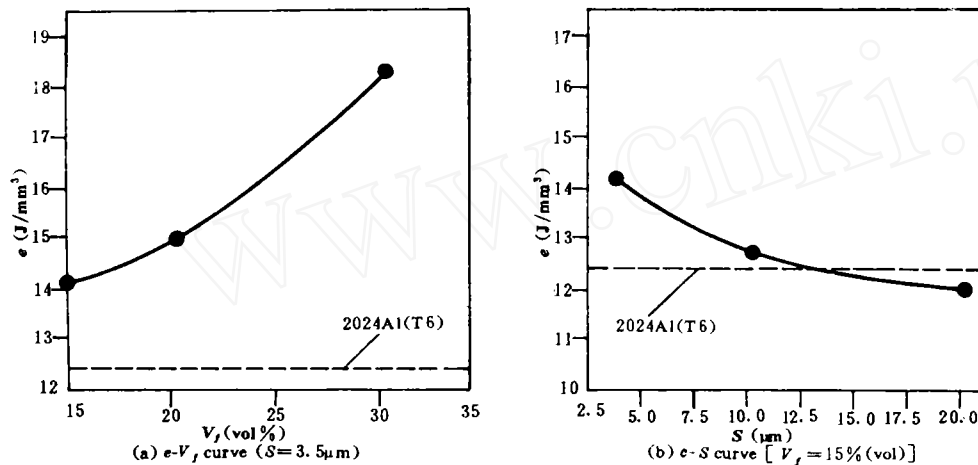


Fig. 2 Variation of specific energy (e) of the composites (as-T6 treated) with volume fraction (V_f) and particle size (S)

图2 经过 T6 强化处理的复合材料的比能耗 e 分别随颗粒含量 V_f 和尺寸 S 变化的关系曲线

关系曲线. 可以看出, 小颗粒复合材料的抗冲击磨粒磨损能力均比基体合金的高, 而且是随着颗粒含量的增加而明显增大; 在相同颗粒含量下, 耐磨性是随颗粒尺寸的增大而下降. 当颗粒尺寸增大到 $14 \mu\text{m}$ 以后, 复合材料的抗磨粒磨损能力越来越比基体合金的低.

图3所示为挤压态复合材料的 $e-S$ 曲线, 可见其比能耗也是随着颗粒尺寸的增大而下降. 虽然含有尺寸为 $20 \mu\text{m}$ 大颗粒的挤压态复合材料试样的抗磨性能比基体合金的高, 但与 T6 强化处理的复合材料试样相比却明显较低.

单摆划痕兼有磨粒磨损和冲击磨损的特点, 材料的耐磨性不仅取决于强度和硬度, 还

与表层材料的变形能力有关。

研究表明,颗粒对基体的强化作用主要是 Orowan 机制^[11]。在同样的颗粒含量条件下,小颗粒复合材料中的颗粒间距很小,与经过T6强化处理后的基体中产生的沉淀相

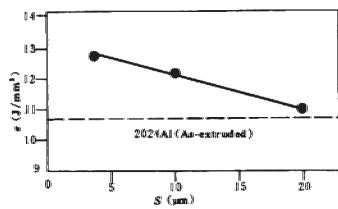


Fig. 3 Variation of specific energy (e) of the composites (as-extruded) with the particle size (S)
Volume fraction of particle in composite is 15%.

图3 挤压态复合材料比能随颗粒尺寸的变化
在复合材料中碳化硅颗粒的体积含量为15%。

以后的断面呈现出典型的塑性剪切特征,这表明含小颗粒的试样具有比较好的塑性变形能力。随着颗粒含量的增大,小颗粒复合材料的整体强度和硬度都明显提高(参见表1所列),然而在划痕过程中表层材料还是保持着比较好的塑性变形能力,划痕表面光滑,磨屑多为板条状,故其抗冲击磨粒磨损能力随着颗粒含量的增加而提高[见图2(a)]。

在颗粒含量 $[V_f = 15\%(\text{vol})]$ 相同的条件下,随着颗粒尺寸的增大,复合材料中的颗粒间距迅速增大,致使 Orowan 强化机制逐渐失去主导作用,代之以颗粒通过界面剪切力承担载荷成为主要强化机制^[12]。这是因为颗粒的尺寸越大,颗粒在受力过程中越容易破碎,所以复合材料的强度和硬度都是随着颗粒尺寸的增大而不断下降(见表1所列)。

另外,随着颗粒尺寸的增大,颗粒与基体之间的协调变形能力迅速减小。在划痕试验过程中,表层颗粒由于发生了剧烈的变形而很容易与基体脱粘,这使其在划头的冲击作用下容易被击碎或拔出,失去抵抗划头切削表层材料的能力,而且破坏了表层基体材料的连续性,致使表层的抗冲击磨粒磨损能力明显变弱。因此,在给定的试验条件下,随着碳化硅颗粒尺寸的增大,复合材料的抗冲击磨粒磨损能力逐渐降低[参见图2(b)所示]。对于含有尺寸为20 μm 大颗粒的复合材料6[#]试样,由于颗粒对基体没有明显的增

强作用,致使位错在变形过程中必须克服相当大的阻力才能绕过颗粒而运动。此外,由于尺寸微小,颗粒在划痕过程中与基体一起变形,不会明显损伤基体良好的塑性变形能力,并能以塑性功的形式吸收相当一部分冲击能。由此可见,高硬度和较好的冲击韧性,是小颗粒复合材料的抗冲击磨粒磨损性能明显比基体合金的高的主要原因。

图4所示为含小颗粒的2[#]试样的划痕表面形貌扫描电子显微镜(SEM)照片,可见划痕表面光滑,无颗粒破碎或拔出现象,这是由于颗粒能够在一定程度上与基体协调变形的缘故;翻卷于边沿的磨屑为板条状,这与基体合金的磨屑相似;划痕右侧磨屑撕掉

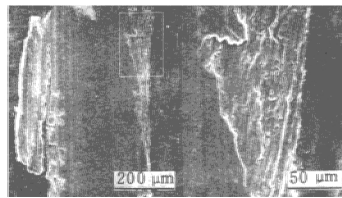


Fig. 4 SEM photograph of the groove surface of specimen 2[#]

(The scratching direction is from up to down)

图4 小颗粒复合材料2[#]试样划痕表面形貌照片
(在划痕试验过程中划头的划动方向是从上到下)

强效果,因而它的强度比基体合金的还低,而且由于碳化硅颗粒不能与基体协调变形,致使这种复合材料试件表层的韧性相当差.由图5所示划痕表层的剖面组织照片可以看出,表层颗粒几乎都遭受到不同程度的破坏或被拔出,并且破坏了表层基体材料的连续

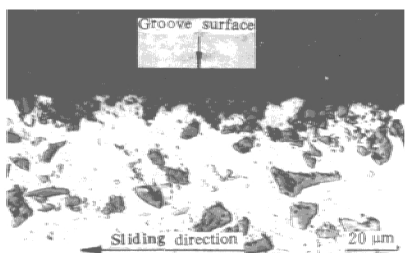


Fig. 5 Sectional-microstructure under the groove surface of specimen 6#

图5 大颗粒复合材料6#试样的划痕表层纵向剖面显微组织照片

性,致使这种大颗粒复合材料的抗冲击磨粒磨损能力比基体合金的低[见图2(b)所示].

由于挤压态基体合金和挤压态复合材料都没有得到沉淀强化,两者的整体强度和硬度都明显地比经过T6强化处理的低.在划痕过程中,不仅基体的承载能力很低,且其支持颗粒的能力也很低.与经过T6处理的复合材料相比,挤压态复合材料的表层颗粒具有更大的脱粘、破碎和被拔出的倾向.图6所示为挤压态复合材料10#试样的划痕形貌,可见其表面呈现出大量的颗粒脱粘、破碎和被拔出现象.因此,挤压态复合材料的抗冲击磨粒磨损性能比经过T6强化处理的差.尽管如此,只要在挤压态基体合金中加入硬质颗粒,其整体强度和硬度也都会有一定程度的提高(表1),因而挤压态复合材料的抗冲击磨粒磨损性能均比基体合金的好(图3).

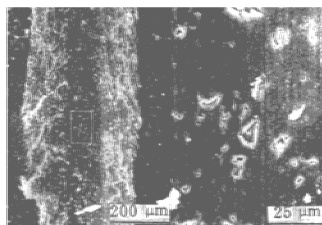


Fig. 6 SEM photograph of specimen 10# groove surface

(The scratching direction is from down to up)

图6 小颗粒复合材料10#试样划痕表面形貌像

(在划痕试验过程中划头的划动方向是从下到上)

4 结论

a. 在本文给定的试验条件下,碳化硅颗粒增强2024Al复合材料的抗冲击磨粒磨损性能比基体合金的好,而且是随着颗粒含量的增加而提高,颗粒尺寸越小,复合材料的抗冲击磨粒磨损性能越好.

b. 经T6强化处理的复合材料的抗磨性能比挤压态的复合材料和基体合金的都好.

c. 碳化硅颗粒增强的2024Al复合材料的抗冲击磨粒磨损能力主要取决于它的力学性能和组织结构,以及碳化硅颗粒与基体的协调变形程度.

参 考 文 献

- [1] Dolowy J F. Increasing focus on silicon carbide-reinforced aluminum composites. *Light Metal Age*, 1986, (5/6): 7-14.
- [2] Ibrahim A, Mohamed F A, Lavernia E J. Particle reinforced metal matrix composites—a review. *J. Mater. Sci.*, 1991, 26: 1 137-1 156.
- [3] Bhansali K J, Mehrabian R. Abrasive wear of aluminum-matrix composites. *J. Metals*, 1982, 32: 30-34.
- [4] Hosking F M, Portillo F F, Wunderlin R *et al.* Composites of aluminum alloys; fabrication and wear behavior. *J. Mater. Sci.*, 1982, 17: 477-498.
- [5] Alpas A T, Embury J D. Sliding and abrasive wear behavior of an aluminum(2024)-SiC particle reinforced composite. *Scripta Metall. Mater.*, 1990, 24: 931-935.
- [6] Roy M, Venkataraman B, Bhanuprasad V V *et al.* The effect of particle reinforcement on the sliding wear behavior of aluminum matrix composites. *Metall. Trans.*, 1992, 23A: 2 833-2 847.
- [7] Vingsbo O, Hogmark S. Single-pass pendulum grooving—a technique for abrasive testing. *Wear*, 1984, 100: 489-502.
- [8] Kennedy F E. Single pass rub phenomena—analysis and experiment. *J. Lubr. Tech.*, 1982, 104: 582-588.
- [9] Li Shizhuo, Li Shu. Tribological evaluation and behavior of superhard coating. *Proc. 8th Intern. Colloq. on Tribology—Tribology 2000*, Esslingen Germany, 1992. 10-16.
- [10] Liang Yanan, Ma Zhongyi, Li Shizhuo *et al.* Impact abrasive behavior of SiC_p/2024Al composites in single pendulum scratch testing. *Wear*, 1994, 178: 9-15.
- [11] Arsenault R J. The strengthening of aluminum alloy 6061 by fiber and platelet silicon carbide. *Mater. Sci. Eng.*, 1984, 64: 171-182.
- [12] Ma Zhongyi, Bi Jing, Lu Yuxiong *et al.* Effect of SiC particle size on properties and fracture behavior of SiC_p/2024Al composites. *Proc. 9th Int. Conf. on Composite Mater. University of Zaragoza, Madrid*, 1993. 448-453.

Study on Impact Abrasion of SiC Particle Reinforced Aluminum Alloy Composite

Liang Yanan Li Shizhuo Ma Zhongyi Li Shu Bi Jing

(*Institute of Metal Research Chinese Academy of Sciences Shenyang 110015 China*)

Yang Shenrong

(*Laboratory of Solid Lubrication Lanzhou Institute of Chemical Physics*

Chinese Academy of Sciences Lanzhou 730000 China)

Abstract The impact abrasion of SiC_p/2024Al composite has been investigated by a single pendulum scratch testing for understanding its wear behavior in dynamic frictional practice. The results show that under a certain test condition the abrasive resistance of composite is better than that of 2024Al alloy, it increases with decreasing particle size and increasing volume fraction of SiC_p; the wear resistance of extruded composite is improved by heat treatment (solid solution at 500 °C for 1 hour, water quenched and aged at 170 °C for 5 hours). The impact abrasive resistance of composite is mainly dependent on the mechanical properties of matrix alloy and the reinforcing mechanism i. e. the mutual restraint among particles as well as the coordination of the particles with the matrix in deformation.

Key words single pendulum scratch, SiC particle, aluminum alloy composite, abrasion