

[文章编号] 1004- 0609(2002)01- 0136- 04

稀土和 Mo_5Si_3 强韧化 MoSi_2 材料的磨粒磨损特性^①

张厚安^{1, 2}, 刘心宇¹, 陈 平², 唐果宁²

(1. 中南大学 材料科学与工程系, 长沙 410083; 2. 湘潭工学院 机械工程与自动化系, 湘潭 411201)

[摘 要] 在 M-2 型摩擦磨损试验机上考察了 MoSi_2 , RE/ MoSi_2 和 $\text{Mo}_5\text{Si}_3/\text{MoSi}_2$ 等 3 种材料在干摩擦条件下与氧化铝砂轮对磨时的磨粒磨损性能, 运用扫描电子显微镜和定点探针观察与分析了其磨损表面形貌, 并对材料的磨损机理进行了探讨。结果表明: 3 种材料均具有较好的抗磨粒磨损特性; 磨损机理主要为微切削、表面氧化和疲劳微断裂; 第二相稀土和 Mo_5Si_3 在一定程度上降低了基体的耐磨性, 主要归因于表面氧化生成膜的不同性质。

[关键词] MoSi_2 ; 稀土; Mo_5Si_3 ; 磨粒磨损; 磨损机理

[中图分类号] TG 148

[文献标识码] A

金属间化合物 MoSi_2 兼具金属和陶瓷双重特性, 其合成和性能的研究受到普遍关注^[1~5]。在 MoSi_2 中加入第二相增强体是一种有效的强韧化方法^[6~10]。然而关于第二相对 MoSi_2 材料的摩擦磨损性能的影响研究较少。Hawk 等^[11~13]对比了 MoSi_2 与 $\text{MoSi}_2\text{-Nb}$ 复合材料的耐磨性, 发现添加 Nb 后 MoSi_2 材料的耐磨性得到了明显改善, 磨损率与 Al_2O_3 和 PS-ZrO_2 材料的相当。Pan 等人^[14]分析了 SiC/ MoSi_2 基复合材料的磨粒磨损性能, 发现 SiC 颗粒的加入使单体 MoSi_2 的磨粒磨损率降低了约 90%。稀土(简称 RE)和 Mo_5Si_3 对 MoSi_2 材料也具有明显的强韧化作用^[15, 16], 但目前尚未见有关它们影响 MoSi_2 材料的摩擦磨损性能方面的报道。作者旨在讨论稀土和 Mo_5Si_3 等第二相在 MoSi_2 材料磨粒磨损过程中的作用, 并探讨磨损机理。

1 实验方法

1.1 样品制备

试样用 MoSi_2 , RE/ MoSi_2 (RE 含量为 0.8%) 和 $\text{Mo}_5\text{Si}_3/\text{MoSi}_2$ (Mo_5Si_3 含量为 12%) 为原料采用机械合金化工艺合成, 并经等静压和高温真空烧结成型^[10], 其性能如表 1 所示。经金相砂纸磨光后的样品尺寸为 $d16\text{ mm}/d40\text{ mm} \times 10\text{ mm}$; 偶件试样选用工业氧化铝砂轮($16\text{ mm}/d50\text{ mm} \times 10\text{ mm}$), 主要成分 $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 88\%$, 粒度为 0.246 mm。

表 1 材料的物理性能

Table 1 Properties of materials

Material	Hv/ GPa	$K_{IC}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
MoSi_2	7.50	4.50
RE/ MoSi_2	10.78	6.21
$\text{Mo}_5\text{Si}_3/\text{MoSi}_2$	9.23	5.75

1.2 摩擦磨损试验

采用 M-2 型摩擦磨损试验机, 在载荷 200 N 和室温(25 ℃)条件下进行干摩擦试验。下试样 MoSi_2 及其复合材料以 200 r/min 速度转动, 上试样氧化铝砂轮以 180 r/min 速度转动, 由于试样外径相差大于 10%, 因而二者间形成滚动和滑动复合摩擦状态。每隔一定时间利用分析天平称量下试样的质量, 并根据试样摩擦磨损试验前后的质量损失计算出磨损率。采用 KY2800 型扫描电子显微镜和定点探针对试样磨损表面进行形貌观察和成分分析。

2 结果与分析

2.1 摩擦磨损性能

MoSi_2 , RE/ MoSi_2 和 $\text{Mo}_5\text{Si}_3/\text{MoSi}_2$ 3 种材料与对磨件在干摩擦状态下对磨时(对磨件为 Al_2O_3 砂轮, 粒度 0.246 mm, 转速 200 r/min, 摩擦力矩 0.2 N/m), 其质量磨损率与时间的关系如图 1 所示。从图 1 可以看出, 3 种材料磨损率均随试验时间的延长而逐渐减小, 在 240 min 时趋于稳定, 且均表现出较好的耐磨性能; MoSi_2 材料的磨损率最小

① [收稿日期] 2001- 03- 26; [修订日期] 2001- 05- 30

[作者简介] 张厚安(1970-), 男, 副教授, 博士研究生。

(约 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$), 稀土和 Mo_5Si_3 第二相的加入则在不同程度上降低了基体材料的耐磨性, 相应的磨损率分别为 $1.19 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $0.69 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$ 。对照表 1 可知, 该实验结果与一般材料的耐磨性 ($1/W$) 正比于材料的硬度 (H) 和断裂韧性 (K_{IC})^[11] ($1/W \propto K_{IC}^{3/4} H^{1/2}$) 的结论不同, 李虎成等^[17] 在研究硼和稀土强韧化 ZA27 合金的摩擦磨

损性能时也发现了类似现象。

2.2 磨损表面 SEM 和定点探针分析

MoSi_2 , $\text{Mo}_5\text{Si}_3/\text{MoSi}_2$ 和 RE/MoSi_2 3 种材料的磨损表面形貌 SEM 照片如图 2 所示。从图 2(a) 可以看出, 磨损表面沿磨削方向形成了许多细小的沟槽痕迹和凹坑, 表明发生了微切削磨损, 这是由于偶件 Al_2O_3 硬颗粒的磨粒磨损作用所致。图 2(b), (c) 和 (d) 分别为 MoSi_2 , $\text{Mo}_5\text{Si}_3/\text{MoSi}_2$ 和 RE/MoSi_2 3 种材料磨损表面放大后的 SEM 照片, 可见表面均分布有剥落的颗粒并存在微裂纹, 预示材料表面在硬颗粒的反复冲击作用下发生了疲劳损坏。

对图 2 中部分接触点进行电子探针分析结果如表 2 所示。对于处于剥落区附近的 A 点, Al(实际为 Al_2O_3) 含量微弱, Mo 与 Si 的摩尔比近似于各材料中的 Mo 和 Si 摩尔比, 说明次表层成分稳定; 对于接触区 B 点或 C 点则 Al 含量高, 反映了在对磨过程中发生了物质转移, 且 Mo 与 Si 之摩尔比也发生了明显变化: MoSi_2 材料表面为 4: 1, 而 $\text{Mo}_5\text{Si}_3/\text{MoSi}_2$ 材料表面的 Mo_5Si_3 已退化为 MoSi_2 , RE/MoSi_2 表面则为 1: 1; 这表明在干摩擦条件下, 材料表面因摩擦热的作用已发生了化学反应, 不同反应

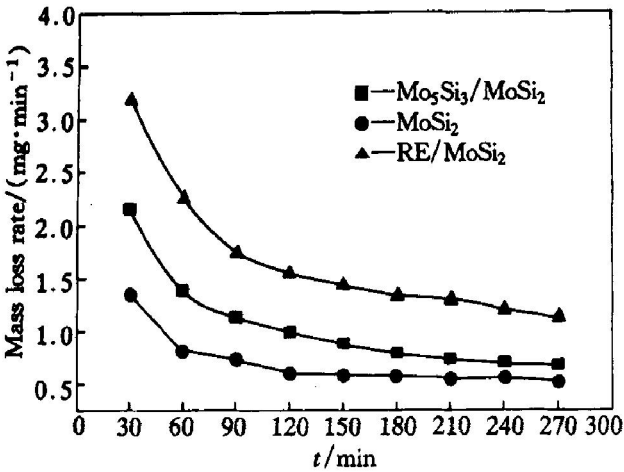


图 1 材料的磨损率曲线

Fig. 1 Variations of wear rate of materials with test duration

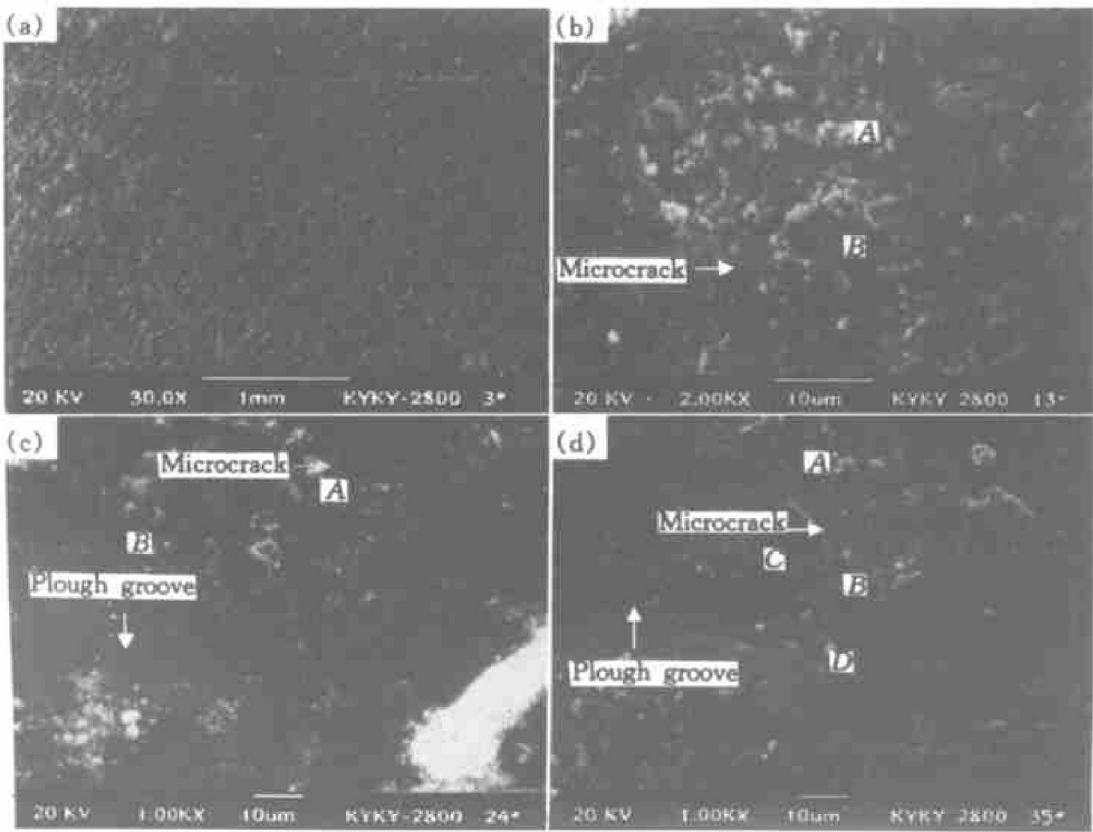


图 2 二硅化钼基复合材料的磨损表面形貌

Fig. 2 SEM micrographs of worn surfaces of MoSi_2 matrix composites

(a) —Surface wear; (b) — MoSi_2 ; (c) — $\text{Mo}_5\text{Si}_3/\text{MoSi}_2$; (d) — RE/MoSi_2

表 2 图 2 中 A, B, C 点电子探针结果

Table 2 Electron microprobe analyzers results of A, B and C dot in Fig. 2

Point	Composition				Experimental parameter		
	<i>x</i> (Mo) / %	<i>x</i> (Si) / %	<i>x</i> (Al) / %	<i>x</i> (RE) / %	<i>V</i> / keV	<i>t</i> / s	<i>α</i> / (°)
Fig. 2(b)	27.36	63.50	9.40	—	20	62	19.49
Fig. 2(c)	38.39	58.35	3.26	—			
Fig. 2(d)	27.36	63.50	9.40	—			
Fig. 2(b)	11.64	47.85	40.51	—	20	62	19.49
Fig. 2(c)	22.85	47.70	29.45	—			
Fig. 2(d)	24.15	23.91	51.07	0.87	20	62	19.49

膜的生成导致了材料表面性质的改变,成为磨损表面疲劳失效程度的主要原因之一。从图 2 可明显看到,RE/MoSi₂ 表面裂纹最宽且深,MoSi₂ 的表面裂纹则最不明显,因而表现出如图 1 所示的不同程度的磨损率。

综上所述,MoSi₂, Mo₅Si₃/MoSi₂ 和 RE/MoSi₂ 3 种材料与氧化铝砂轮在干摩擦条件下对摩时,表现出较好的耐磨性能,其磨粒磨损机理主要为微切削、表面氧化和疲劳微断裂。由于表面生成氧化膜的不同性质的差异,第二相稀土和 Mo₅Si₃ 的加入尽管提高了基体材料的硬度和断裂韧性,但降低了材料的耐磨性能。

3 结论

1) MoSi₂, Mo₅Si₃/MoSi₂ 和 RE/MoSi₂ 3 种材料均具有较好的抗磨粒磨损性能,其磨损机制主要为微切削、表面氧化和疲劳微断裂。

2) 第二相稀土和 Mo₅Si₃ 在一定程度上降低了基体的耐磨性,主要归因于对摩过程中表面氧化生成膜的不同性质。

[REFERENCES]

[1] ZHANG Hou-an, LIU Xin-yu, NING Ai-lin, et al. Rare earth activated sintering of MoSi₂ and its electric conductivity [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2001, 11(1): 141– 144.

[2] 王德志, 刘心宇, 左铁镭, 等. 球磨条件对 MoSi₂ 形成的影响 [J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(4): 600– 604.

WANG De-zhi, LIU Xin-yu, ZUO Tie-yong, et al. Effect of ball milling condition on formation of MoSi₂ [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(4): 600– 604.

[3] 王学成, 柴惠芬, 王笑天. 燃烧合成 MoSi₂ 的组织结构特征分析 [J]. 中国有色金属学报, 1995, 5(2): 103– 107.

WANG Xue-cheng, CHAI Hui-fen, WANG Xiao-tian. Analyses of structure of MoSi₂ by SHS [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1995, 5(2): 103– 107.

[4] Petrovic J J. MoSi₂-based high-temperature structural silicides [J]. MRS Bulletin, 1993, 8(7): 35– 40.

[5] Petrovic J J and Vasudevan A K. Key developments in high temperature structural silicides [J]. Mater Sci Eng, 1999, A261: 1– 5.

[6] Lu T C, Evans A G, Hecht R J, et al. Toughening of MoSi₂ with a ductile (niobium) reinforcement [J]. Acta Metall Mater, 1991, 39(8): 1853– 1862.

[7] Maloy S A, Lewandowski J J, Heuer A H, et al. Effects of carbon additions on the high temperature mechanical properties of molybdenum disilicide [J]. Mater Sci Eng, 1992, A155: 159– 163.

[8] Jeng Y L, Lavernia E J. Review processing of molybdenum disilicide [J]. J Mater Sci, 1994, 29: 2557 – 2571.

[9] Suzuki Y, Sekino T, Niihara K. Effects of ZrO₂ addition on microstructure and mechanical properties of MoSi₂ [J]. Script Metall Mater, 1995, 33(1): 69– 74.

[10] 张厚安, 王德志, 刘心宇. 稀土在合成 MoSi₂ 中的作用 [J]. 粉末冶金技术, 1998, 16(3): 256– 259.

ZHANG Hou-an, WANG De-zhi, LIU Xin-yu. Effects of rare earth element on synthesis of MoSi₂ [J]. Powder Metallurgy Technology, 1998, 16(3): 256– 259.

[11] Hawk J A, Alman D E, Stoloff N S. Abrasive wear behavior of MoSi₂-Nb composites [J]. Script Metall Mater, 1994, 31(4): 473– 478.

[12] Hawk J A, Alman D E. A comparative study of the abrasive wear behavior of MoSi₂ [J]. Script Metall Mater, 1995, 32(5): 725– 730.

[13] Hawk J A, Alman D E, Petrovic J J. Abrasive wear of Si₃N₄-MoSi₂ composites [J]. Wear, 1997, 203– 204:

- 247– 256.
- [14] Pan J, Surappa M K, Saravanan R A, et al. Fabrication and characterization of SiC/MoSi_2 composites [J]. Mater Sci Eng, 1998, A244: 91– 198.
- [15] 张厚安, 唐果宁, 龙春光. 稀土增强 MoSi_2 力学性能的研究 [J]. 湘潭矿业学报, 1998, 13(3): 61– 64.
- ZHANG Hou-an, TANG Guo-ning, LONG Chun-guang. Study of mechanic properties of MoSi_2 reinforced by rare-earth element [J]. J Xiangtan Mining Institute, 1998, 13(3): 61– 64.
- [16] 王德志. MoSi_2 及 MoSi_2 基、复合材料的合成及其组织性能的研究 [D]. 长沙: 中南工业大学, 1998.
- WANG De-zhi. Study on the synthesis, structure and properties of MoSi_2 and MoSi_2 -based composites [D]. Changsha: Central South University of Technology, 1998.
- [17] 李虎成, 杨 通, 李利君. 硼和稀土对 ZA27 合金的机械及摩擦磨损性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 1995, 5(Suppl. 2): 151– 154.
- LI Hu-cheng, YANG Tong, LI Li-jun. Effect of boron and rare earth on mechanical and wearing properties of ZA27 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1995, 5(Suppl. 2): 151– 154.
- [18] 全永昕, 施高义. 摩擦磨损原理 [M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1986, 11: 190– 240.
- QUAN Yong-xin, SHI Gao-yi. Foundation of Friction and Wear [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 1986. 190– 240.
- [19] 屈晓斌, 陈建敏, 周惠娣, 等. 材料的磨损失效及其预防研究现状与发展趋势 [J]. 摩擦学学报, 1999, 19(2): 187– 192.
- QU Xiao-bin, CHEN Jian-min, ZHOU Hui-di, et al. Current state and development trend of the research on material wear failure and failure prevention [J]. Tribology, 1999, 19(2): 187– 192.
- [20] 赵 明, 黄莉萍, 丁传贤, 等. 三种结构材料陶瓷摩擦副的干摩擦研究 [J]. 摩擦学学报, 1998, 18(1): 1– 6.
- ZAO Ming, HUANG Li-ping, DING Chuan-xian, et al. Dry friction and wear study of three ceramic couples [J]. Tribology, 1998, 18(1): 1– 6.
- [21] 廖乾初, 蓝芬兰. 扫描电镜分析技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990. 222– 317.
- LIAO Gan-chu, LAN Fen-lan. Analysis Technology and Application of Scan Electronic Microscopy [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1990. 222– 317.

Abrasive wear behaviors of MoSi_2 reinforced by rare earth and Mo_5Si_3 under dry friction

ZHANG Hou-an^{1, 2}, LIU Xir-yu¹, CHEN Ping², TANG Guo-ning²

(1. Department of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Department of Mechanical Engineering and Automation, Xiangtan Polytechnic University, Xiangtan 411201, China)

[Abstract] The abrasive wear behaviors of MoSi_2 , rare-earth/ MoSi_2 and $\text{Mo}_5\text{Si}_3/\text{MoSi}_2$ materials in sliding against Al_2O_3 grinding wheel under dry friction were investigated by using an M-2 abrasion wear tester. A scanning electron microscope with electron microprobe analyzers was used for the analysis and determination of the wear mechanisms. The results show that the three materials have excellent abrasive wear resistance. The abrasive wear of the MoSi_2 matrix composites is governed by microcutting, oxidation on the surface and fatigue microcrack. The addition of rare earth or Mo_5Si_3 all increase the wear rate of MoSi_2 , which is attributed to the resultant generation of the oxide film changing on the worn ceramic surfaces.

[Key words] MoSi_2 ; rare earth; Mo_5Si_3 ; abrasive wear; wear mechanism

(编辑 朱忠国)