

2024 铝合金在干摩擦往复运动条件下的磨损图研究

张爱民, 陈建敏, 吕晋军, 阎逢元

(中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 研究了 2024 铝合金/45[#] 钢摩擦副在干摩擦往复运动条件下的摩擦学特性, 系统考察了载荷 98~ 490 N 和速度 0.083~ 1.167 m/s 范围内摩擦副材料的磨损行为; 通过对磨损表面、断面以及铝在摩擦偶件的转移膜及磨屑的显微分析, 建立了 2024 铝合金的磨损机制转变图。结果表明: 2024 铝合金在低速和轻载条件下的磨损机制主要是磨粒磨损和剥层磨损; 而在高速重载条件下的磨损机制主要是严重熔融磨损, 并伴随向偶件材料表面的大量转移。

关键词: 2024 铝合金; 干摩擦; 摩擦学特性; 磨损图

中图分类号: TG146·2¹

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(2002)02-0094-05

铝质材料因其易磨损和难润滑等缺点严重限制了其应用。目前, 对铝质材料磨损特性的研究大多侧重于单一机理, 而较少考虑不同机理之间的关系^[1], 并着眼于较轻载荷范围^[2]。自 L. Im 等^[3]构造出第一副磨损机理图并明确提出磨损图的概念以来, 许多学者都试图利用“磨损图”来概括铝质材料的磨损行为与机理。Antoniou 等^[4]建立了第一幅铝合金磨损图; 刘勇兵等^[5,6]提供了更为详细准确的铝合金磨损图。然而, 磨损图的绘制是综合大量已发表文献的数据及作者的数据, 通过归一化处理并建立数学模型而绘成, 往往难以从磨损表面、断面及磨屑等方面综合揭示磨损机制的转变。本文作者使用往复摩擦试验机, 在较高载荷范围和较宽速度范围内考察 2024 铝合金/45[#] 钢摩擦副在干摩擦往复运动条件下的磨损特性, 并通过对磨损表面、断面、磨屑及金属铝在摩擦偶件表面转移膜的形貌分析, 建立了 2024 铝合金的磨损机制转变图。

1 实验部分

采用 $\varnothing 8$ mm \times 30 mm 的 2024 铝合金(其中含有 4.5% Cu 和 1.5% Mg)圆柱, 其在室温下的硬度为 139 HB, 表面粗糙度 R_a 为 0.34 μ m; 摩擦偶件为尺寸 60 mm \times 15 mm \times 10 mm 的未淬火 45[#] 钢试块。试验前将 45[#] 钢块的摩擦面用 900[#] 水砂纸打磨至表面粗

糙度 R_a 为 0.72 μ m, 然后将铝栓和 45[#] 钢块在丙酮中超声清洗 10 min, 并用热风吹干。

采用日本产 RFT-III 型往复摩擦磨损试验机评价摩擦副材料的摩擦磨损性能, 摩擦副接触方式为栓-块面接触; 滑动速度为 0.083~ 1.167 m/s, 法向载荷为 98~ 490 N, 单次往复行程为 10 cm, 每次试验的总行程为 1 000 m; 环境温度为 20~ 25 $^{\circ}$ C, 相对湿度 28%~ 40%。用 DJ2/500 型精密电子天平测量试样的磨损质量损失, 然后经换算得到线磨损率。

用日本 JEM-5700LV 型扫描电子显微镜(SEM)对磨痕表面、断面、磨屑及转移膜进行形貌分析, 使用 KEVEX 能谱仪(EDAX)对磨损表面进行元素面分布分析和磨屑组成分析。

2 结果与讨论

2.1 2024 铝合金的磨损特性

图 1 给出了在干摩擦往复运动条件下与 45[#] 钢对磨时, 2024 铝合金线磨损率随滑动速度及载荷的变化关系。可以看出, 在干摩擦往复运动条件下, 2024 铝合金的磨损行为十分复杂, 很难用一种简单的模式来概括。根据 2024 铝合金线磨损率的数量级差别, 可以将其大致分为图 2 所示的 4 个区域。

2.2 磨损表面、次表面及磨屑分析

为了确定图 2 给出的磨损图上不同区域的磨损

基金项目: 国家自然科学基金(59925513); 美国通用汽车公司资助课题(2000)。

收稿日期: 2001-04-00; 修回日期: 2001-11-20/联系人陈建敏, E-mail: jn.chen@isl.ac.cn

作者简介: 张爱民, 男, 1974 年生, 博士研究生, 主要从事铝质材料磨损失效分析和摩擦学表面改性研究。



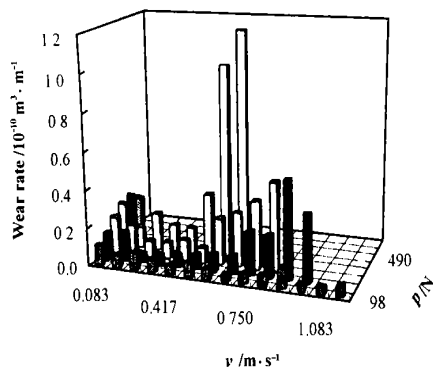


Fig 1 The influence of load and sliding speed on the wear rate of 2024 aluminum alloy under dry reciprocating sliding

图 1 载荷和滑动速度对 2024 铝合金在干摩擦往复运动条件下线磨损率的影响

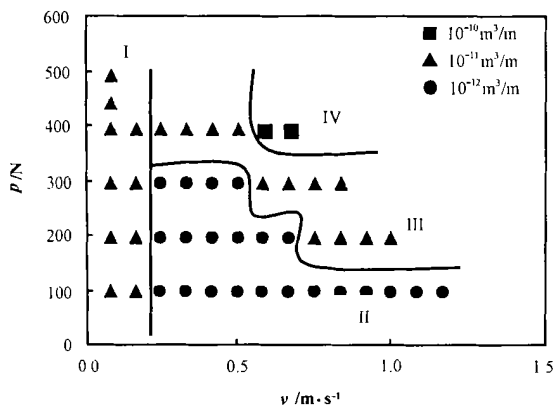


Fig 2 The wear map of 2024 aluminum alloy under dry reciprocating sliding against steel

图 2 2024 铝合金在干摩擦往复运动条件下的磨损图

机制,对所有样品的磨损表面、磨屑和典型 2024 铝合金样品的断面进行了显微分析。图 3 给出了在较低滑动速度条件下处于区域 I 的典型样品 ($p = 196 \text{ N}$, $v = 0.083 \text{ m/s}$) 的磨损表面、断面及磨屑形貌 SEM 照片。由图 3(a) 可见,在上述运行条件下,2024 铝合金表面有大量平行于滑动方向的犁沟,在犁沟中分布有大量坑状剥落,由高倍形貌照片[图 3(b)]可以看出在滑动方向的垂直和平行方向均分布着微裂纹。从 2024 铝合金磨损断面形貌[图 3(c)]也可观察到次表层微裂纹形成及其以一定角度向表面的扩展,而表面裂纹沿滑动方向的垂直和平行方向扩展,当裂纹交汇后导致片状及坑状剥落。在该试验条件下,磨屑呈黑色细碎粉状[见图 3(d)],其直径小于 $1 \mu\text{m}$,这是由于在较低滑动速度下,磨屑无法及时排出从而在摩擦副接触表面之间被反复碾压所致。由 EDAX 分析可知其主要

成分为铁和铝的氧化物。在 45# 钢磨损表面[图 3(e)]平行于滑动方向也可以观察到较浅的犁沟和坑状剥落,并可见表面断裂及片状剥落迹象,由元素面分布可知在 45# 钢表面存在少量粘着转移的铝。

图 4 给出了在中等的滑动速度和载荷条件下,区域 II ($p = 196 \text{ N}$, $v = 0.667 \text{ m/s}$) 的摩擦副磨损表面及磨屑的形貌 SEM 照片。由图 4(a) 可见,在 2024 铝合金表面有大量平行于滑动方向的犁沟,但磨痕较为光滑,坑状剥落消失。磨屑主要为呈现银色金属光泽的片状磨屑[图 4(b)],由 EDAX 分析可知其主要为片状的金属铝磨屑,其尺寸约为 $30 \sim 50 \mu\text{m}$,铁含量较区域 I 有所降低。偶件 45# 钢磨损表面形貌与区域 I 类似,但粘着转移的铝增多。

图 5 给出了在较高滑动速度和中等载荷条件下,区域 III ($p = 196 \text{ N}$, $v = 1.000 \text{ m/s}$) 的摩擦副磨损表面及磨屑形貌 SEM 照片。由图 5(a) 可以看出,2024 铝合金表面平行于滑动方向的犁沟明显减少,磨损表面较为光滑,同时可以看出严重的塑性变形流动迹象[图 5(b)]。磨屑形貌 SEM 分析和组成 EDAX 分析表明,在该试验条件下主要形成铝的片状磨屑,其尺寸约为 $70 \sim 100 \mu\text{m}$,而铁含量很少。45# 钢磨损表面形貌与区域 I 和区域 II 相比变化不大,但表面形成了较为连续的铝转移层。

图 6 给出了在高速重载条件下,处于区域 IV ($p = 392 \text{ N}$, $v = 0.583 \text{ m/s}$) 的摩擦副磨损表面、断面及磨屑的形貌 SEM 照片。由图 6(a) 可见,2024 铝合金磨损表面平行于滑动方向的犁沟完全消失,磨损表面十分光滑,破损边缘较为光滑,这是由于摩擦过程中铝合金表面发生了严重的熔融,同时也可观察到严重塑性变形发生。由图 6(b) 可以看出,2024 铝合金磨损表面断面发生了严重塑性变形,有大量裂纹生成并呈放射状扩展。磨屑形貌 SEM 分析表明,此条件下形成的铝的片状磨屑其直径约为 $200 \sim 400 \mu\text{m}$ 。摩擦偶件 45# 钢的磨损特征没有明显改变,但表面有大量连续的铝的层状转移膜形成,导致其磨损后重量增加。

2.3 铝合金在干摩擦、往复运动条件下的磨损图

综上所述,在较低的滑动速度下(区域 I),由于摩擦偶件表面硬质微突体的犁削而导致铝合金表面发生二体磨粒磨损,长时间往复运动还可导致剥层磨损;同时较低的滑动速度不利于磨屑的排除,由于反复碾压作用形成黑色细碎的金属氧化物磨屑。随着滑动速度的升高,在中等滑动速度和载荷下(区域 II),2024 铝合金的主要磨损形式是由于犁削而导致的二体磨粒磨损,由于滑动速度的增加,试验时间缩短,剥

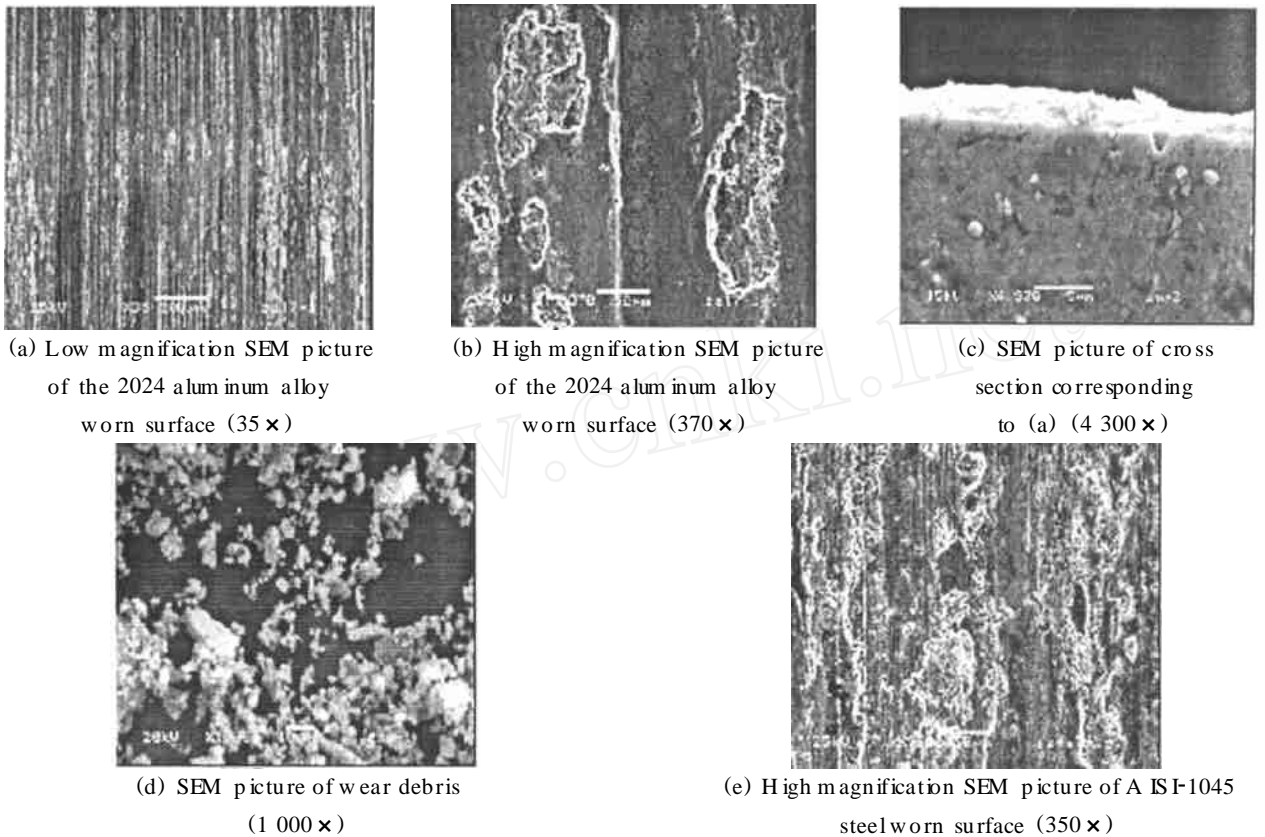


Fig 3 SEM pictures of worn surface and wear debris of 2024 aluminum alloy and A ISF-1045 steel

图 3 铝合金/45# 钢摩擦副磨损表面、断面及磨屑形貌 SEM 照片

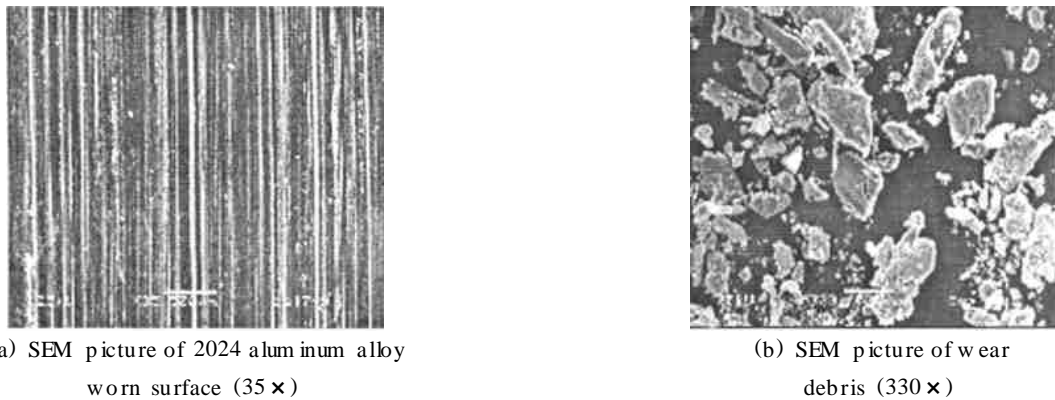


Fig 4 SEM pictures of worn surfaces of 2024 aluminum alloy and A ISF-1045 steel

图 4 2024 铝合金/45# 钢摩擦副磨损表面及磨屑形貌 SEM 照片

层磨损消失, 这导致区域 II 的线磨损率较区域 I 有所降低, 同时铝的粘着转移较区域 I 加剧。在较高的滑动速度和载荷条件下 (区域 III), 2024 铝合金的主要磨损形式是严重塑性变形流动, 铝的粘着转移进一步加剧, 同时伴随有二体磨粒磨损。在重载高速条件下 (区域 IV), 2024 铝合金的主要磨损形式是严重熔融磨损, 并伴随着金属铝向 45# 钢偶件表面的大量粘着转移。据此可以得到如图 7 所示的 2024 铝合金在干摩擦往复运动条件下的磨损机制转变图。

通过上述分析, 我们可以发现摩擦偶件 45# 钢的主要磨损形式为剥层磨损和磨粒磨损, 但在较高滑动速度和载荷下, 其线磨损率由于铝向其表面的大量转移而减小; 而对应于 2024 铝合金严重熔融磨损区域的 45# 钢的线磨损率为负值。

3 结论

在干摩擦往复运动和本文所选定的试验条件下, 2024 铝合金在较低滑动速度下的主要磨损机制为二



(a) Low magnification SEM picture of the 2024 aluminum alloy worn surface (35 ×)

(b) High magnification SEM picture of 2024 aluminum alloy and A ISI-1045 steel (350 ×)

Fig 5 SEM pictures of worn surfaces of 2024 aluminum alloy and A ISI-1045 steel

图 5 2024 铝合金/45# 钢摩擦副磨损表面形貌 SEM 照片



(a) Low magnification SEM picture of 2024 aluminum alloy worn surface (35 ×)

(b) SEM picture of cross section corresponding to (a) (1 600 ×)

Fig 6 The SEM pictures of 2024 aluminum alloy and 45# steel

图 6 2024 铝合金/45# 钢摩擦副磨损表面、断面形貌 SEM 照片

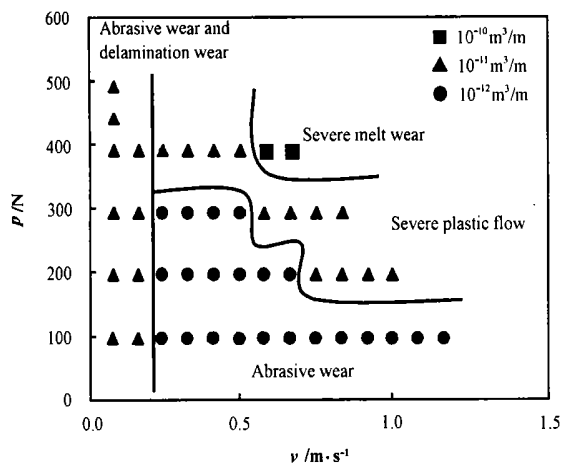


Fig 7 The wear map of 2024 aluminum alloy under dry reciprocating sliding against steel

图 7 2024 铝合金在干摩擦往复运动条件下的磨损图

体磨粒磨损和剥层磨损; 在较轻载荷和较高滑动速度下的主要磨损机制为二体磨粒磨损; 在较高滑动速度和载荷条件下的主要磨损机制为严重塑性变形流动; 在高速重载条件下的磨损机制为严重熔融磨损和粘着磨损 45# 钢摩擦偶件的主要磨损机制为剥层磨损

以及磨粒磨损, 其线磨损率主要受铝的粘着转移的影响

参考文献:

[1] Yang D H (杨德华), Xue Q J (薛群基), Zhang X S (张绪寿), et al Current state and trend of study on wear map (磨损图研究的发展现状与趋势)[J]. Tribology (摩擦学学报), 1995, 15 (3): 281-288

[2] Wilson S, A lpa s A T. Them al effects on mild wear transitions in dry sliding of an aluminum alloy[J]. Wear, 1999, 225-229: 440-449.

[3] Lin S C, Ashby M F. Wear-mechanism maps [J]. Acta Metallurgy, 1987, 35 (1): 1-24

[4] Antoniou R, Subramanian C. Wear mechanism map for Aluminum alloys[J]. Scripta Metallurgica, 1988, 22 (6): 809-813

[5] Cao Z Y (曹占义), Lu Y (陆有), Sun D R (孙大仁), et al Method and progress of study on wear maps (磨损图研究的方法与进展)[J]. Tribology (摩擦学学报), 1997, 17 (2): 185-191.

[6] Liu Y B, A sthana R, Rohatgi R. A map for wear mechanisms in aluminum alloys J Mater Sci, 1991, 26: 99-102

The Wear Map of 2024 Aluminum Alloy Under Dry Sliding Against Mild Steel

ZHANG Aimin, CHEN Jianmin, LU Jinjun, YAN Fengyuan

(State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P R China)

Abstract: Wear map research is one of the hot points in tribology. It has been applied to many materials for classifying and ordering of wear data and for revealing of the relationship between the competing wear mechanisms. However, little attention has been paid to the relationship between the transformation of wear mechanisms and the growth of crack in subsurface concerning the research on wear map up to now. Thus the tribological properties of aluminum alloy sliding against AISI1045 steel were examined, with an emphasis on the transformation of the wear mechanisms under different testing conditions and on the relationship between the wear mechanism transformation and the generation of micro-cracks in the sub-worn surface. Accordingly, the wear map of 2024 aluminum alloy under dry sliding against the mild steel was constructed based on careful analysis of the worn surface, cross-section, transfer film and wear debris by means of scanning electron microscopy and energy dispersive spectrometry. As the results, 2024 Al alloy was characterized by abrasive wear and delamination wear at very small normal load and slow sliding speed. It was characterized by severe melt wear and adhesion transfer onto the counterface at very high normal load and sliding speed. The transformation of the wear mechanisms is highly dependent on the direction of the growth of cracks in sub-worn surface.

Key words: 2024 aluminum alloy; dry friction; tribological characteristics; wear map

Author: ZHANG Aimin, male, born in 1974, Ph.D. student, E-mail: jmchen@lsl.ac.cn