

AZ91 及 AZ91-Y 合金复合干摩擦性能的对比

Comparison on the rolling-sliding dry friction property of AZ91 and AZ91-Y alloy

李春华,王 晗,郝 海

(大连理工大学 材料科学与工程学院,辽宁 大连 116024)

LI Chun-hua, WANG Han, HAO Hai

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

摘要: 为了探究 AZ91 镁合金的复合干摩擦行为,以未淬火 45 钢为摩擦副,在不同载荷下(100,200,300 N),开展 AZ91 及 Y 含量为 1.0%(质量分数)合金的复合干摩擦实验。采用 OM,XRD,SEM 等观察合金的磨损形貌并分析磨损机理。结果表明:增加法向载荷,两试样复合磨损率线性增加但摩擦因数却逐渐减小; Al_2Y 硬质颗粒可细化晶粒、弱化相界面开裂倾向以提高 AZ91-Y 合金耐磨性。100,300 N 法向载荷下,AZ91-Y 合金主要磨损机制分别为磨粒磨损和剥离磨损,与基体(AZ91)一致,其磨损率分别降低了 21.7%和 5.9%。

关键词: AZ91;复合干摩擦;磨粒磨损;剥离磨损

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2018.001159

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)01-0108-07

Abstract: The rolling-sliding dry friction properties of AZ91 and AZ91-Y (1.0% Y) (mass fraction) were studied with 45 steel as friction pair. The experiment was carried out under different normal loads (100, 200, 300 N), respectively. The worn surfaces of AZ91 and AZ91-Y samples were investigated by energy dispersive spectrometer (EDS), scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) so as to analyze wear mechanism. The results indicate that the wear rates of AZ91 and AZ91-Y samples boost linearly but the friction coefficients are decreased gradually with the increase of normal loads. Al_2Y particles can refine grains, weaken the tendency of interface cracking to improve the wear resistance. Hence, the wear rates of AZ91-Y are decreased by 21.7% and 5.9% compared with AZ91 alloy when normal loads are 100, 300 N, respectively. Meanwhile, the main wear mechanisms of AZ91-Y alloy are abrasive wear and delamination wear, which is the same with AZ91 alloy.

Key words: AZ91; composite dry friction; abrasive wear; delamination wear

镁合金因密度小、比强度高、比弹性模量大等优点,而被广泛用于航空航天、电子、汽车等领域^[1-3]。但镁合金同时存在强度低、变形能力差以及耐磨性不足等缺点。实际应用中常引入稀土元素以提高其力学、铸造及耐磨等性能^[4-6]。然而镁合金在加工服役过程中,与相互接触的材料不可避免地发生摩擦磨损而损失质量,例如变速箱的壳体与传动轴、转向盘服役工况以及镁合金的轧制加工等^[7]。针对这种现状,国内外学者对镁合金的摩擦性能开展了大量的研究,如 Chen 等在不同的滑动速率及载荷下研究 AZ91 摩擦磨损行

为,结果表明氧化及剥离磨损是轻微磨损的主要机制,而熔化和大塑性变形是严重磨损的主要机制^[8]。Torres 等向 AM50B 镁合金中添加不同含量的 SiC 颗粒并研究其摩擦磨损性能,结果表明低载荷(10~40 N)下氧化磨损为主要机制,高载荷下(150~250 N)磨粒磨损和剥层磨损为主要磨损机制^[9]。祁庆璐等在载荷为 20~110 N 范围内研究不同稀土含量对 AZ91 镁合金的滑动摩擦性能,指出稀土元素会细化合金组织,在摩擦过程中会增强氧化膜的稳定性从而增强 AZ91 的耐磨性^[10]。Kumar 等研究涂层成分

对 AZ91 滑动摩擦性能的影响,结果表明掺杂 CeO_2 的 Al_2O_3 涂层有效提高 AZ91 滑动摩擦性能^[11]。Lpezato 等研究纳米石墨颗粒对 AZ91 离子氧化涂层耐磨性能影响,结果表明纳米石墨颗粒可以填充涂层气孔,可使涂层致密化提高其耐磨性能^[12]。Gao 等研究 TiB_2 颗粒对 AZ91 合金耐磨性能的影响,结果表明 TiB_2 可通过提高材料强度和硬度以增强 AZ91 的耐磨性^[13]。Zafari 等在高温下(100~250 ℃)研究 3% RE 作用下 AZ91 摩擦性能,结果表明 RE 可以提高 AZ91 热稳定性和高温强度以提高其高温摩擦性能^[14]。Yan 等研究稀土 Y 作用下,挤压并经过 T6 处理态的 AZ91 合金的滑动摩擦性能,结果表明增大法向载荷,磨损率逐渐增大而摩擦因数逐渐减小,稀土 Y 可有效提高 AZ91 滑动摩擦性能^[15]。但现有报道主要集中在镁合金滑动摩擦方面,滚滑动复合摩擦的相关研究鲜有报道,而镁合金轧制加工等服役工况中,因复合摩擦而造成材料损失的现象时常发生。相关研究表明,1.0%Y(质量分数,下同)作用下 AZ91 合金的显微组织与力学性能最优^[16-17],简称为 AZ91-Y 合金。因此,在不同载荷下对比开展该合金与 AZ91 基体的复合摩擦实验,从而探究 AZ91 镁合金复合摩擦磨损规律。

1 实验材料与方法

原材料纯度均为工业纯,其中不同材料的质量分数如下所示:纯镁锭(>99.95%)、纯铝锭(>99.7%)、纯锌锭(>99.99%)以及中间合金 Mg-3.5Mn, Mg-25Y,采用 X 射线荧光光谱仪检测 AZ91 及 AZ91-Y 试样化学成分,试样实际成分如表 1 所示,同时摩擦环尺寸内外径分别为 16mm 和 40mm。

表 1 不同试样的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of different samples(mass fraction/%)

Sample	Al	Zn	Mn	Y	Mg
AZ91	9.1867	0.8956	0.2833	—	Bal
AZ91-Y	9.2409	0.7935	0.2528	0.9783	Bal

图 1,2 分别是 AZ91-Y 试样的 XRD 图谱及 Al_2Y 颗粒相形貌。复合摩擦实验参数如下:法向载荷分别为 100,200,300 N,试样转速 $300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,对磨时间 100 min,滚滑比 1:10,对摩擦副为未淬火 45 钢。采用电子分析天平检测磨损量、带有 EDS 能谱仪的 Supra55 型号扫描电镜观察试样表面磨损形貌、DNS100 型号万能试验机测试试样拉伸强度,拉伸速率为 $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,拉伸试样的尺寸符合 GBT228—2002 标准。

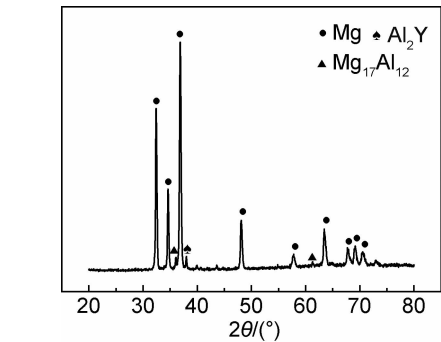


图 1 AZ91-Y 铸态合金 X 射线衍射图谱
Fig. 1 XRD patterns of AZ91-Y as-cast alloy



图 2 AZ91-Y 试样中 Al_2Y 颗粒相
Fig. 2 Al_2Y particles phase of AZ91-Y sample

2 结果与分析

2.1 实验结果

图 3(a)为不同载荷下试样的磨损率,磨损率随法向载荷的增大而增大。在相同载荷下 AZ91-Y 试样的磨损率均低于基体,其中 100 N 和 300 N 载荷下, AZ91-Y 合金耐磨性分别提高了 21.7%和 5.9%。稀土 Y 元素可消除杂质并提高氧化膜的黏附性,同时 Y 元素在熔体中原位生成 Al_2Y 硬质颗粒,消耗熔体中的 Al 元素以降低 β 相的含量,因此可弱化 β 相与镁基体界面的开裂倾向^[18-19]。灰色块状的 Al_2Y 颗粒在 AZ91-Y 试样中弥散分布如图 2 所示, Al_2Y 颗粒维氏硬度(548.0)明显高于镁基体(55.3)^[21],具有良好的耐磨性。 Al_2Y 颗粒会在熔体凝固过程中发挥异质形核作用细化 AZ91-Y 合金的铸态晶粒,细晶强化与弥散强化复合作用提高 AZ91-Y 合金力学性能如图 3 (b)所示。图 3(c)为不同载荷下 AZ91 试样复合摩擦因数,随法向载荷增大摩擦因数逐渐减小。因为材料表面的复合应力场(循环载荷,摩擦力)随法向载荷增大而增大,加剧试样的塑性流变程度。塑性流变进一步增大摩擦副之间的接触面积,使其增幅高于法向载

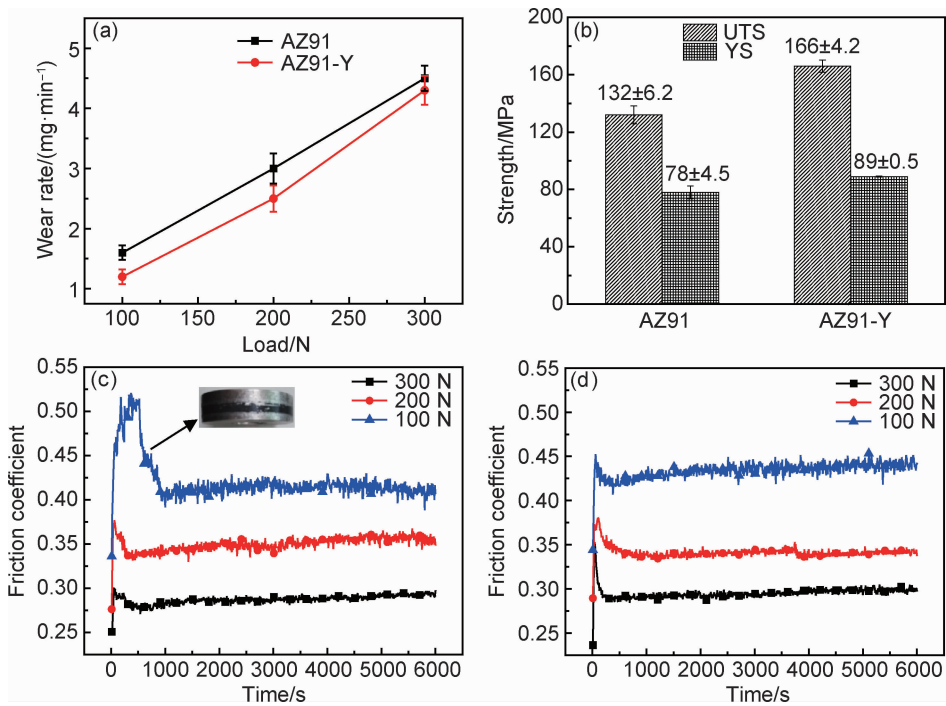


图 3 AZ91 和 AZ91-Y 试样实验结果图

(a)磨损率;(b)拉伸性能;(c)AZ91 摩擦因数;(d)AZ91-Y 摩擦因数

Fig. 3 Diagram of experimental results of AZ91 and AZ91-Y samples

(a)wear rate;(b)tensile property;(c)AZ91 friction coefficient;(d)AZ91-Y friction coefficient

荷的增幅,同时塑性流变也会降低材料表面的粗糙度。100 N 载荷下,AZ91 试样表面生成黑色氧化膜,黑色氧化膜的粗糙度较大且不易磨损,这造成低载荷(100 N)下复合摩擦因数的波动明显高于其他载荷。

图 3(d)为 AZ91-Y 摩擦因数,其变化趋势与 AZ91 基本一致。由于 Al₂Y 颗粒与基体的粗糙度不同,法向载荷 100 N 时,AZ91-Y 合金的摩擦因数波动幅度大于其他载荷,而且随时间延长呈轻微上升趋势。复合摩擦过程中,Al₂Y 颗粒相的剥落会增大试样表面的粗糙度。硬质颗粒 Al₂Y 的质量分数会对 AZ91-Y 合金耐磨性产生显著影响,因此利用 K 值法计算其质量分数,计算结果约为 1.7%(Mg 作为内标),这表明 AZ91-Y 合金中稀土 Y 元素主要存在形式是 Al₂Y 颗粒相。当法向载荷增大至较高载荷时(200,300 N),AZ91-Y 试样的磨损率明显增大,Al₂Y 颗粒的剥落坑可以在短时间内被磨平,因此摩擦因数相对平稳波动。

2.2 受力分析

复合摩擦试样在接触面上的应力分布符合赫兹理论,图 4 是摩擦试样表面的应力分布示意图,最大法向应力在试样中间轴线上,两侧应力呈椭圆分布递减。稀土 Y 元素是 AZ91-Y 与 AZ91 试样力学性能存在差异的主要因素,因此基于赫兹接触理论,以 AZ91 试样进行受力计算,同时依据稀土 Y 元素与 AZ91 的作用

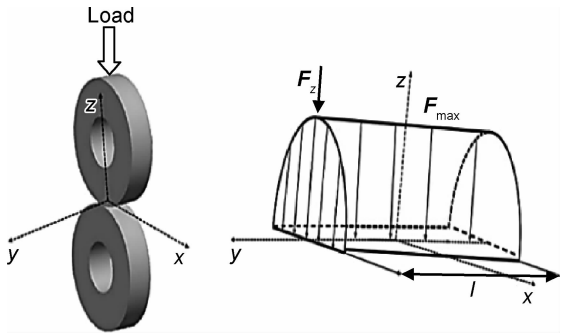


图 4 摩擦试样表面的应力分布示意图

Fig. 4 Stress distribution schematic diagram of friction sample surface

机理,定性分析 AZ91-Y 试样的载荷分布。

在法向载荷作用下,接触面附近发生微小的变形区。根据赫兹接触理论计算 AZ91 试样矩形变形区半宽^[22],用字母 A 表示。式中 W 代表法向载荷;L 代表试样厚度;γ 代表泊松比;E 代表弹性模量。计算过程所涉及材料参数如表 2 所示。试样变形区大小与其半径、材料泊松比、弹性模量以及法向载荷有关。在复合摩擦过程中,材料理论变形力可以由矩形接触面积与屈服载荷的乘积得到,计算结果如表 3 所示。

低载荷时(100 N),AZ91 法向载荷与屈服载荷的应力值相近,但材料未发生明显裂纹扩展(如图 5(a)所示),因其在作用点受三向压应力而变形困难。

表 2 试样的材料参数

Table 2 Material parameters of samples

Material	Elasticity modulus/GPa	Poisson's ratio
1045	210	0.269
AZ91	45	0.350

表 3 AZ91 试样赫兹计算结果汇总

Table 3 Summary of results of AZ91 sample
calculated according to hertz theory

Normal load/N	A/ μm	Yield load/N
100	55	86
200	78	121
300	96	150

AZ91-Y 试样实际屈服应力略高于 AZ91,因此也未发生明显变形及裂纹扩展(如图 5(b)所示)。当法向载荷上升至 300 N 时,法向载荷明显高于屈服载荷,两试样端面的磨损裂纹如图 5(c),(d)所示。裂纹沿与表面夹角约 20°方向向下扩展,裂纹扩展到一定距离后又萌生出向下扩展的微裂纹,主裂纹最终折向表面剥落掉块。复合摩擦实验中,试样滚动接触疲劳而剥落的凹坑如图 6 所示。法向载荷 300 N 时,试样表面摩擦力会显著增大,材料在交变循环载荷与摩擦力叠加下,最大综合切应力将移动到试样表面并造成材料疲劳磨损^[22-23],相似情况在钢铁复合摩擦的研究中存在^[24-28]。

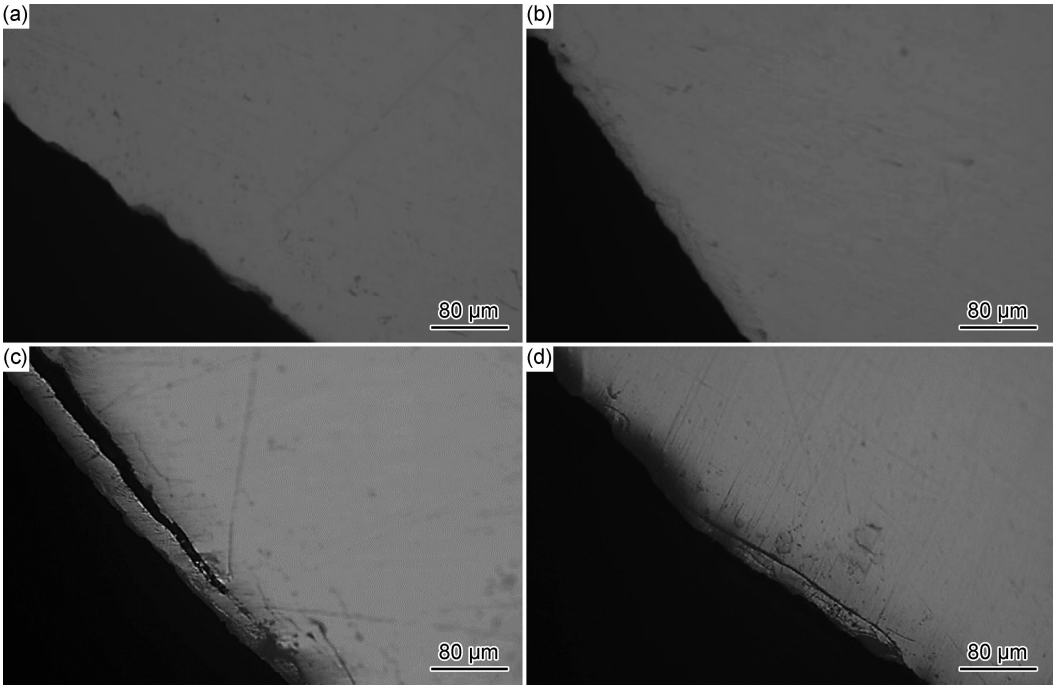


图 5 不同法向载荷下磨损试样的端面照片 (a)100 N,AZ91;(b)100 N,AZ91-Y;(c)300 N,AZ91;(d)300 N,AZ91-Y;

Fig. 5 End pictures of wear samples under different normal loads (a)100 N,AZ91;(b)100 N,AZ91-Y;(c)300 N,AZ91;(d)300 N,AZ91-Y

300 N 法向载荷下,AZ91 试样在复合应力场下发生塑性流动并在表面萌生疲劳裂纹,试样中的气孔,分散缩孔等铸造缺陷会加剧疲劳裂纹扩展,AZ91-Y 试样表面也存在一定的裂纹,但原位生成的 Al₂Y 颗粒会细化晶粒以提高铸件质量并阻碍裂纹扩展,因此疲劳裂纹萌生倾向及扩展速率小。

2.3 磨损形貌分析

法向载荷 100 N 时试样的磨损形貌如图 6(a),(b)所示,氧化物与 AZ91 基体结合良好且硬度较高,磨损过程中破裂的氧化物未能及时从摩擦面中脱离出去而充当磨粒,使 AZ91 表面出现轻微磨粒磨损,AZ91-Y 试样抗氧化性较强,因此磨损表面相对平整而没有明显的氧化物磨屑。A 点的 EDS 能谱结果如

表 4 所示,白色磨屑是氧化镁与氧化铁的混合物,这表明低载荷(100 N)下试样发生黏着磨损,摩擦副中的 Fe 元素通过氧化膜黏着点转移到试样表面,此时摩擦因数较大而磨损量较小,这和图 3(a)中磨损量以及图 3(c),(d)中摩擦因数测试结果一致。

但在法向载荷作用下,高硬度摩擦副的粗糙峰压入 AZ91-Y 表面发生二体磨粒磨损,同时从基体中剥离的小尺寸 Al₂Y 颗粒临时充当磨粒而发生磨粒磨损,因此其表面出现清晰的犁沟样划痕。法向载荷为 100 N 时,试样存在多种磨损机制,如磨粒磨损、氧化磨损与黏着磨损,主要磨损机制为磨粒磨损。200 N 载荷下 AZ91 试样的犁沟样划痕进一步扩大,剥离磨损的特征显著增加如图 6(c),(d)所示。

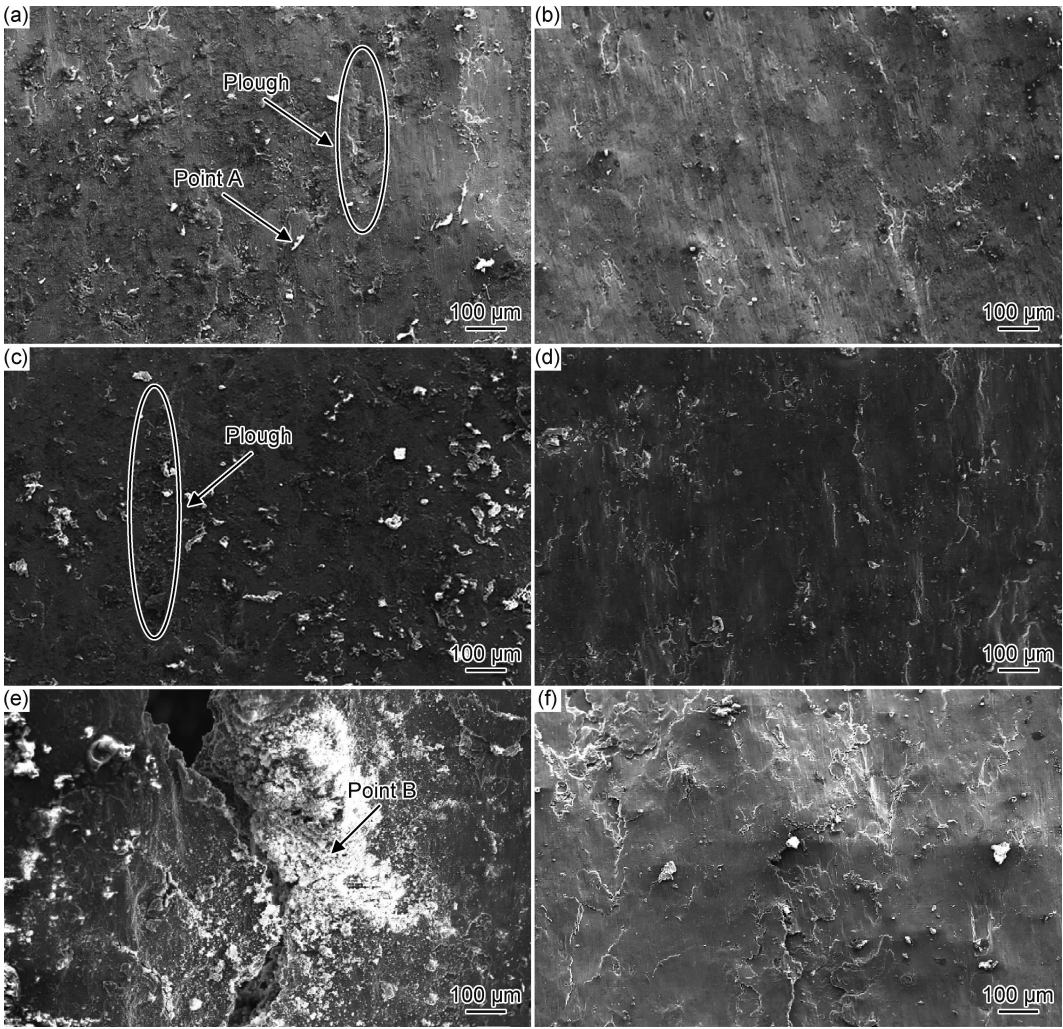


图 6 不同载荷下磨损试样扫描电镜照片

(a) 100 N, AZ91; (b) 100 N, AZ91-Y; (c) 200 N, AZ91; (d) 200 N, AZ91-Y; (e) 300 N, AZ91; (f) 300 N, AZ91-Y

Fig. 6 SEM images of wear samples under different loads

(a) 100 N, AZ91; (b) 100 N, AZ91-Y; (c) 200 N, AZ91; (d) 200 N, AZ91-Y; (e) 300 N, AZ91; (f) 300 N, AZ91-Y

表 4 不同点 EDS 能谱结果(质量分数/%)

Table 4 EDS results of different points(mass fraction/%)

Point	C	O	Mg	Al	Fe	Zn
A	49.58	29.28	16.72	1.62	2.03	0.77
B	28.87	27.74	8.90	0.83	33.67	—

随着法向载荷增大, AZ91 合金磨损表面生成大量氧化物磨屑, 部分磨屑楔入基体中加剧磨损, 同时试样表面的剥离磨损形态逐渐明显。在交变循环的法向力及表面摩擦力的共同作用下, AZ91 表面萌生裂纹并扩展发生剥层磨损。在相同载荷下, AZ91-Y 表面的犁沟痕迹加深, 剥层磨损的面积明显扩大, 可能是在二体磨粒磨损的机理下由微观切削磨损逐渐转变为挤压剥落与疲劳剥落, 微观机理改变导致材料复合磨损率增大。

300 N 载荷下试样表面出现明显的塑性变形及疲劳裂纹, 材料发生严重的剥离磨损, 这与表 3 计算结果

基本一致, 即法向载荷明显高于理论变形载荷时, 试样进入屈服阶段, 实际接触面积随载荷的增大而增大, 高载荷下材料发生塑性流动而使实际接触面积的增值超过相应载荷, 同时塑性流动可降低试样表面粗糙度, 因此复合摩擦因数随载荷的增大而减小。AZ91 试样的疲劳裂纹在边界处萌生并失稳扩展, 裂纹附近有大量的白色氧化物磨屑的堆积。B 点的 EDS 能谱结果如表 4 所示, 图 6(e) 白色氧化物中 Fe 元素含量明显增多, 即高载荷下摩擦副与 AZ91 试样黏着磨损加剧, 黏着点的破裂诱导材料发生剥层磨损增大复合磨损率。AZ91-Y 磨损表面的氧化物相对较少, 但表面出现一定量的凹坑如图 6(f) 所示, 凹坑是大颗粒相的 Al_2Y 剥落以及大片氧化磨屑在法向应力切削下产生。因此试样在 300 N 法向载荷下, 磨损机制为氧化磨损, 剥层磨损, 黏着磨损以及疲劳磨损, 主要磨损机制是剥层磨损, 多种磨损机制复合作用导致试样磨损率增大。

3 结论

(1)随法向载荷逐渐增大,AZ91 与 AZ91-Y 试样的复合磨损率线性增大,300 N 载荷下,两试样磨损率分别增大,材料发生明显塑性流变使其接触面积的增幅高于法向载荷,但复合摩擦因数逐渐减小。

(2)复合摩擦工况下,试样表面应力分布符合赫兹理论,剥层裂纹从表面萌生并斜向下扩展发生磨损。原位生成的 Al_2Y 硬质颗粒可发挥异质形核作用,增强材料塑性变形抗力以提高 AZ91-Y 镁合金的耐磨性。

(3)AZ91 及 AZ91-Y 合金的主要磨损机制与载荷相关,100 N 和 300 N 载荷下主要磨损机制分别是磨粒磨损和剥层磨损,AZ91-Y 合金耐磨性分别提高了 21.7% 和 5.9%。

参考文献

- [1] 席俊杰,刘杰.高性能稀土镁合金的研究及其应用[J].热加工工艺,2014,43(10):6-10.
XI J J,LIU J. Research and application of high performance rare earth magnesium alloy[J]. Hot Working Technology,2014,43(10):6-10.
- [2] 袁杰,郭宝会.Mg 合金在汽车工业中的应用进展[J].铸造技术,2017,38(12):2799-2804.
YUAN J,GUO B H. Research advances of magnesium alloys in automobile applications[J]. Foundry Technology,2017,38(12):2799-2804.
- [3] 吴国华,陈玉狮,丁文江.镁合金在航空航天领域研究应用现状与展望[J].载人航天,2016,22(3):281-292.
WU G H,CHEN Y S,DING W J. Current research,application and future prospect of magnesium alloys in aerospace industry[J]. Manned Spaceflight,2016,22(3):281-292.
- [4] 刘军,张金玲,渠治波,等.稀土 Gd 对 AZ31 镁合金耐蚀性能的影响[J].材料工程,2018,46(6):73-79.
LIU J,ZHANG J L,QU Z B,et al. Effect of rare earth Gd on corrosion resistance of AZ31 magnesium alloy[J]. Journal of Materials Engineering,2018,46(6):73-79.
- [5] 万迪庆,袁艳平,周新建.高强镁合金组织细化方法研究现状[J].材料导报,2015,29(9):76-80.
WAN D Q,YUAN Y P,ZHOU X J. A review of microstructure refinement methods for high strength magnesium alloys[J]. Materials Reports,2015,29(9):76-80.
- [6] 陈巧旺,汤爱涛,许婷熠,等.高性能铸造稀土镁合金的发展[J].材料导报,2016,30(17):1-9.
CHEN Q W,TANG A T,XU T Y,et al. High performance cast magnesium rare-earth alloys: retrospect and prospect[J]. Materials Review,2016,30(17):1-9.
- [7] 唐见茂.新能源汽车轻量化材料[J].新型工业化,2016,6(1):1-14.
TANG J M. New energy vehicle lightweight materials[J]. Journal of New Industrialization,2016,6(1):1-14.
- [8] CHEN H,ALPAS A T. Sliding wear map for the magnesium alloy Mg-9Al-0.9Zn (AZ91)[J]. Wear,2000,246(1):106-116.
- [9] TALTAVULL C,RODRIGO P,TORRES B,et al. Dry sliding wear behavior of AM50B magnesium alloy[J]. Materials & Design,2014,56(4):549-556.
- [10] 祁庆据,刘勇兵,杨晓红.稀土对镁合金 AZ91D 摩擦磨损性能的影响[J].中国稀土学报,2002,20(5):428-432.
QI Q J,LIU Y B,YANG X H. Effects of rare earths on friction and wear characteristics of magnesium alloy AZ91D[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society,2002,20(5):428-432.
- [11] KUMAR S,KUMAR D. Role of CeO_2 doping on tribological behavior of Al_2O_3 coated AZ91 alloy[J]. Surface & Coatings Technology,2018,349(18):462-469.
- [12] LPEZZATO, VANGELINI, KBRUNELLI, et al. Tribological and corrosion behavior of PEO coatings with graphite nanoparticles on AZ91 and AZ80 magnesium alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2018,28(2):259-272.
- [13] XIAO P,GAO Y M,XU F X,et al. Tribological behavior of *in-situ* nanosized TiB_2 particles reinforced AZ91 matrix composite[J]. Tribology International,2018,128(12):130-139.
- [14] ZAFARI A,GHASEMI H M,MAHMUDI R. An investigation on the tribological behavior of AZ91 and AZ91+3wt%RE magnesium alloys at elevated temperatures[J]. Materials & Design,2014,54(2):544-552.
- [15] YAN H,WANG Z W. Effect of heat treatment on wear properties of extruded AZ91 alloy treated with yttrium[J]. Journal of Rare Earth,2016,34(3):308-314.
- [16] 董方,刘月,郭升乐,等.稀土元素 Y 对 AZ91D 镁合金显微组织和力学性能的影响[J].轻合金加工技术,2018,46(5):66-70.
DONG F,LIU Y,GUO S Y,et al. Effects of Y on microstructure and mechanical properties of AZ91D magnesium alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology,2018,46(5):66-70.
- [17] TONG G D,LIU H F,LIU Y H. Effect of rare earth additions on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Societys of China,2010,20(2):336-340.
- [18] 王雪敏,曾小勤,吴国松,等.合金元素对镁合金氧化性能的影响[J].材料导报,2006,20(11):69-72.
WANG X M,ZENG X Q,WU G S,et al. The effects of alloy elements on oxidation properties of magnesium alloys[J]. Materials Reports,2006,20(11):69-72.
- [19] QI Q J. Friction and wear characteristics of rare earth-containing magnesium alloy[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals,2006,16(7):1219-1226.
- [20] 苏桂花,曹占义.稀土镁合金抗氧化的机理[J].铸造,2010,59(6):553-557.
SU G H,CAO Z Y. Oxidation resistance mechanism of rare earth magnesium alloy[J]. Foundry,2010,59(6):553-557.
- [21] HAO H,LIU X T,FANG C F,et al. Effect of *in-situ* Al_2Y particles on the as-cast/as-rolled microstructure and mechanical properties of AZ31 alloy[J]. Materials Science & Engineering: A,2017,698:27-35.

[22] 束德林. 工程材料力学性能[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
SHU D L. Mechanical properties of engineering materials[M]. Beijing:China Machine Press,2007.

[23] FACCOLI M,PETROGALLI C,LANCINI M,et al. Effect of desert sand on wear and rolling contact fatigue behavior of various railway wheel steels[J]. Wear,2018,396/397(2):146-161.

[24] WANG G,QU S,LAI F,et al. Rolling contact fatigue and wear properties of 0.1C-3Cr-2W-V nitrided steel[J]. International Journal of Fatigue,2015,77(8):105-114.

[25] BAKSHI S D,LEIRO A,PRAKASH B,et al. Dry rolling/sliding wear of nanostructured bainite[J]. Wear,2014,316(1/2):70-78.

[26] DALLAGO M,BENEDETTI M,ANCELOTI S,et al. The role of lubricating fluid pressurization and entrapment on the path of inclined edge cracks originated under rolling-sliding contact fatigue: numerical analyses *vs* experimental evidences[J]. International Journal of Fatigue,2016,92(12):517-530.

[27] DING H H,FU Z K,WANG W J,et al. Investigation on the effect of rotational speed on rolling wear and damage behaviors of wheel/rail materials[J]. Wear,2015,330/331(5/6):563-570.

[28] 何成刚,周桂源,王娟,等. 曲率半径对车轮滚动接触疲劳性能的影响[J]. 摩擦学学报,2014,34(3):256-261.
HE C G,ZHOU G Y,WANG J,et al. Effect of curve radius of rail on rolling contact fatigue properties of wheel steel[J]. Tribology,2014,34(3):256-261.

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0701204)

收稿日期:2018-10-06;修订日期:2019-07-05

通讯作者:郝海(1969—),男,教授,博士,现从事轻合金凝固及强韧化研究,联系地址:辽宁省大连市甘井子区凌工路2号大连理工大学材料学院(116024),E-mail:haohai@dlut.edu.cn

(本文责编:杨 雪)