

Y 含量对 Mg-Al-Zn 堆焊合金摩擦磨损性能的影响

陈庆强¹, 赵志浩², 王高松¹, 朱庆丰¹, 陶 凯¹, 朱 成¹

(1. 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

(2. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 研究了 Y 元素添加及其含量对 AZ91 焊丝堆焊 Mg-Al-Zn 合金室温下干滑动摩擦磨损性能及磨损机制的影响。结果表明: 由于存在粗大 β -Mg₁₇Al₁₂ 相, 未添加稀土 Y 元素的 AZ91 堆焊合金的耐磨性能较差; 通过添加稀土 Y 元素, 可以减小粗大 β 相的尺寸和数量, 减小亚表层变形层的厚度以及堆焊合金发生剥层磨损的程度, 提高堆焊合金的耐磨性; 稀土 Y 元素会导致堆焊合金的硬度降低; AZ91 堆焊合金的主要磨损机制有 3 种: 磨粒磨损、氧化磨损和剥层磨损。
关键词: AZ91 镁合金; 堆焊; 摩擦磨损; 显微组织

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)06-1812-06

镁合金具有低密度、高比刚度和高比强度等优点, 目前已被广泛应用于航空航天、汽车制造、3C 数码等领域, 是一种极具竞争力的轻量化材料^[1,2]。然而, 在使用的过程中, 镁合金结构(零)件表面不可避免的会产生磨损、腐蚀、裂纹等局部损伤, 这些损伤严重影响了镁合金材料的整体性能和使用寿命, 但对其整体更换会消耗大量资源。堆焊作为一种传统的表面修复技术, 可对镁合金构件表面出现的划伤与磨损等进行有效地修复, 提高其性能和寿命。

磨损作为一种材料失效的重要形式, 会对镁合金材料的性能和寿命造成重大损伤。一般来说, 堆焊后的局部耐磨性能会对材料整体的性能产生重要影响。大量研究表明^[3-5], 在镁合金中添加稀土元素可显著改善其摩擦磨损性能。因此, 本实验在传统的 AZ91 镁合金焊丝中添加了稀土 Y 元素, 研究 Y 元素含量对焊丝堆焊后金属的摩擦磨损性能和磨损机制的影响。

1 实 验

实验选用 AZ91 镁合金作为原材料, 通过在熔炼过程中添 Mg-Y 中间合金(Y 含量为 20.15%)的形式加入稀土 Y 元素。将所得铸锭进行热挤压, 最终得到直径为 3.0 mm 的 Y 元素含量不同的 AZ91 镁合金焊丝。使用该焊丝作为焊接材料进行焊接, 采用厚度为 10 mm 的铸态 AZ91 圆片作为母材。焊丝和母材的化学成分如表 1 所示。使用手工惰性气体钨极保护焊(TIG)

表 1 实验所用焊丝及母材的化学成分

Table 1 Chemical composition of welding wires and base metal (wt%)

Alloy	Al	Zn	Mn	Y	Mg
AZ91	9.49	0.82	0.64	—	Bal.
AZ91+1Y	9.02	0.91	0.54	0.89	Bal.
AZ91+2Y	9.21	0.81	0.50	1.75	Bal.
Base metal	8.95	0.71	0.33	—	Bal.

在母材表面进行堆焊, 堆焊试样尺寸为 $\Phi 20$ mm $\times$ 30 mm, 焊接过程示意图如图 1 所示。焊接前, 对母材表面进行机械抛光后使用有机溶剂清洗, 以去除污渍及氧化层等。焊接采用的电流为 130 A, 电压为 15 V, 使用纯度为 99.99% 的氩气进行保护, 流量为 16 L/min。使用线切割将堆焊试样沿纵剖面切开并进行机械抛光, 使用混合酸对其进行腐蚀, 使用光学显微镜(OM, DMI5000M, Leica)和扫描电子显微镜(SEM, SSX-550, SHIMADZU)对其进行微观组织观察。使用图像处理软件 Image Pro Plus 统计微观组织照片中 β -Mg₁₇Al₁₂ 相所占的面积分数。使用 X 射线衍射仪(XRD, MPDDY2094, PANalytical B.V., Almelo)对合金中的物相组成进行分析。使用宏观硬度计(452-SVD, Wolpert)对样品进行硬度测试, 每个试样测试 4 次取平均值。使用导电率仪(SMP10, SIGMASCOPE)对样品进行导电率测试。

摩擦磨损试验在立式万能摩擦磨损试验机(MMD-1)上进行, 摩擦形式为室温(~ 25 °C)下的销

收稿日期: 2017-08-04

基金项目: 国家自然科学基金(51204053); 教育部项目基本科研业务费项目国家项目培育种子基金(N150904002); 省科技项目重点实验室(LZ2015040)

作者简介: 陈庆强, 男, 1992 年生, 博士生, 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819, 电话: 024-83681758, E-mail: neucqq@163.com

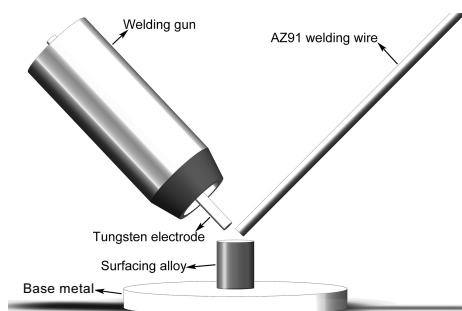


图 1 堆焊示意图

Fig.1 Schematic representation of surfacing welding

盘式干滑动摩擦磨损, 试验载荷为 100 N, 滑动速度为 0.78 m/s, 距离为 1.5 km, 摩擦磨损示意图如图 2a 所示。摩擦磨损盘使用未经热处理的 45 号钢 (ASTM1045) 加工而成, 硬度为 24.8 HRC, 试验前使用水砂纸打磨至 2000# 后使用有机溶剂清洗, 最后烘干。摩擦销尺寸为 $\Phi 4.75$ mm $\times$ 12.8 mm, 为了避免组织不均匀对试验结果产生影响, 摩擦销均取自堆焊试样的中心部位 (图 2b)。试验前后均使用电子分析天平称量试样质量, 称量 3 次取平均值, 计算磨损率。试验后将摩擦销沿纵截面抛开, 使用光学显微镜观察摩擦面亚表层微观组织。使用 SEM 观察磨损表面及磨屑形貌。

2 结果与分析

2.1 Y 含量对镁合金堆焊层组织的影响

添加不同含量的 Y 元素后, 堆焊 AZ91 合金的微观组织如图 3 所示。由图可以看出, Y 含量为 0% 的 AZ91 合金的微观组织由 α -Mg 基体和晶界处析出的网状的 β -Mg₁₇Al₁₂ 相组成 (图 3a)。为了更加细致地观测 β 相的形貌, 使用 SEM 和能谱 (EDS) 对其进行分析, 结果如图 4a, 4b 所示。可以看出, β 相主要呈不规则的长条状和块状, 在 β 相的孔洞中存在少量 α -Mg。在 β 相的边缘, 附着有大量 α -Mg 与 β -Mg₁₇Al₁₂ 交替分布的

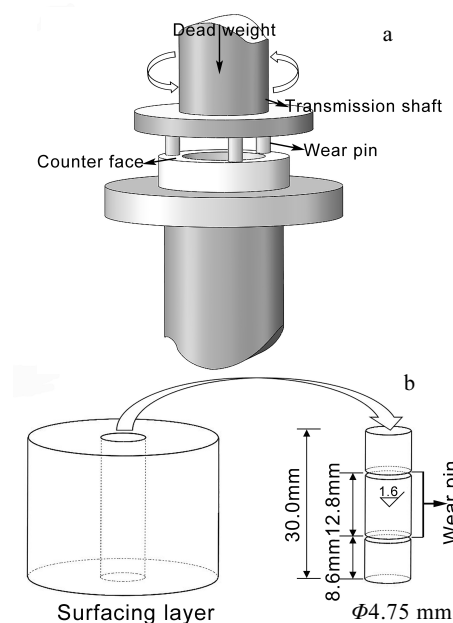


图 2 摩擦磨损试验, 摩擦销取样位置示意图

Fig.2 Schematic representation of the pin-on-disc experimental configuration (a) and sampling location (b)

片层状共晶组织。对于 AZ 系镁合金中的 β -Mg₁₇Al₁₂ 相的形貌, 相关文献已经进行了大量的研究^[6-9]。

添加了 1%Y 元素后, 合金的微观组织如图 3b 所示。可以看出, β 相由网状破裂成不相连的块状, 数量有所减少。使用 SEM 和 EDS 进行分析 (图 4c, 4d), 可以看出, Y 元素主要以不规则的球状相的形式存在于 Mg 基体中, 直径 1~3 μ m。使用 XRD 对合金的物相组成进行分析, 结果如图 5 所示。可以看出, 稀土 Y 元素在堆焊合金中主要以 Al₂Y 相的形式存在。继续增加 Y 元素含量至 2%, β 相的尺寸和数量进一步减小 (图 3c)。使用图像处理软件 Image Pro Plus 对不同 Y 元素含量的堆焊合金中 β -Mg₁₇Al₁₂ 相所占面积分数进行统计, 结果如表 2 所示。可以看出, 随着 Y 元素含量的增加, Mg₁₇Al₁₂ 的数量逐渐减少。

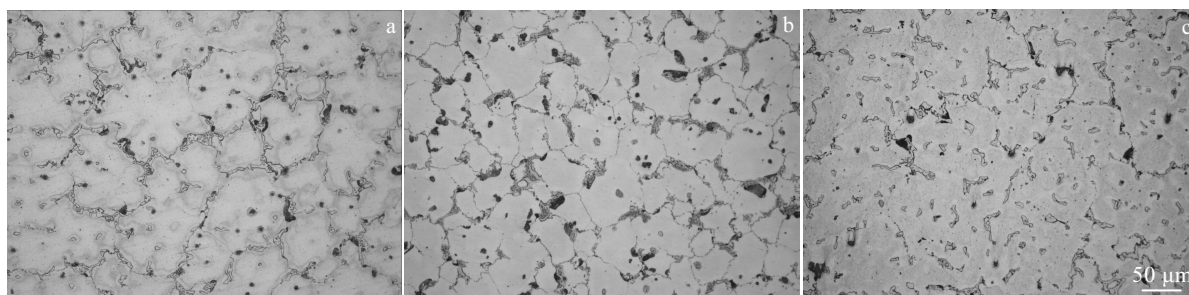


图 3 堆焊镁合金显微组织照片

Fig.3 OM microstructures of the surfacing welding alloys: (a) AZ91, (b) AZ91+1Y, and (c) AZ91+2Y

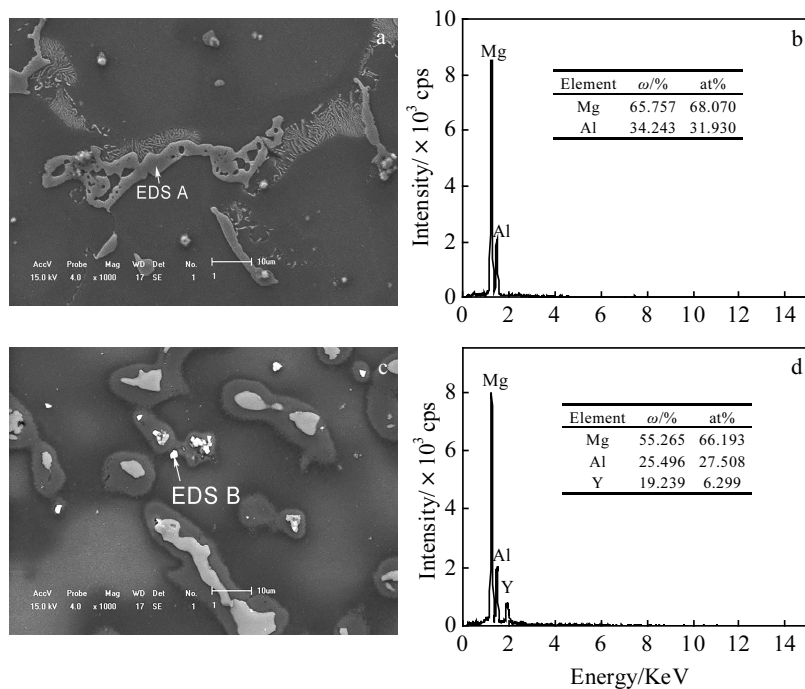


图 4 堆焊镁合金 SEM 照片以及 EDS 测试结果

Fig.4 SEM micrographs and EDS results of surfacing welding alloys: (a) AZ91; (b) EDS result of arrow A depicted in Fig.4a; (c) AZ91+1Y; (d) EDS result of arrow B depicted in Fig.4c

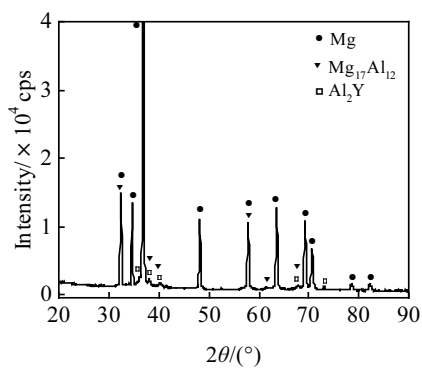


图 5 含 1%Y 元素的堆焊合金 XRD 图谱

Fig.5 XRD pattern of the surfacing welding AZ91 alloys with 1%Y

表 2 不同 Y 含量的堆焊合金中的第二相面积分数

Table 2 Area percentage of the second phase (%)

Material	AZ91	AZ91+1Y	AZ91+2Y
Percentage	11.99	10.57	7.19

2.2 Y 含量对镁合金堆焊层摩擦磨损性能的影响

2.2.1 摩擦磨损试验结果

摩擦系数和磨损率是摩擦磨损试验中衡量材料耐磨性优劣的一个重要参数。一般情况下,当试验条件相同时,合金的摩擦系数和磨损率越小,其耐磨性越

好^[10]。图 6 为 3 种成分的堆焊合金的摩擦磨损试验结果。可以看出,稀土元素的添加显著改善了 AZ91 堆焊合金的耐磨性能。未添加稀土元素的堆焊合金的磨损率最高,为 $4.26 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/\text{m}$; 添加了 1% 的 Y 元素后,合金的磨损率显著降低至 $3.36 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/\text{m}$; 继续增加稀土元素的含量至 2%,堆焊合金的磨损率略有降低,为 $3.02 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/\text{m}$ 。摩擦系数的变化规律与磨损率类似,未添加稀土元素的堆焊合金的摩擦系数最高,为 0.309; 添加了 1% 的 Y 元素后,其摩擦系数迅速降低至 0.242; 继续增加稀土元素的含量,摩擦系数的变化不明显。

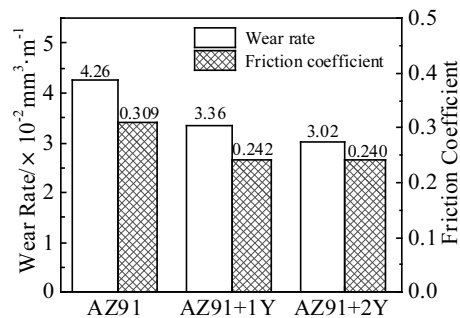


图 6 堆焊镁合金的摩擦系数及磨损率

Fig.6 Friction coefficients and wear rates of the tested alloys

材料的摩擦磨损是一个较为复杂的过程, Meng^[11]等人指出, 在摩擦磨损过程中有超过 100 个不同的变量或因数。其中, 材料的硬度是影响材料耐磨性能的一个重要参数。因此, 对本实验中 3 种成分的合金进行硬度测试, 结果如表 3 所示。可以看出, 随着 Y 元素含量的增加, AZ91 堆焊合金的硬度由 690 MPa 逐渐降低至 517 MPa。这可能是由于 $Mg_{17}Al_{12}$ 属于硬脆相, 其显微硬度远高于 Mg 基体^[12], 而根据微观组织照片(图 3)和对 β 相所占面积分数的统计(表 2)可知, Y 元素的添加使 β 相的数量减少, 从而导致了合金硬度的降低。同时, Al 原子的溶解也使样品的导电率明显下降(表 3)。

根据 Archard 定律^[13]和 Yan 等人的研究^[4], 材料的硬度越高, 耐磨性越好。然而, 本次试验的结果并不符合该规律。分析原因, 可能与堆焊镁合金中 β 相的尺寸过于粗大有关。韩秋华^[14]和 A. H. Feng 等^[15,16]认为, 粗大的 $Mg_{17}Al_{12}$ 在变形的过程中容易引起应力集中并成为裂纹源, 从而对材料的力学性能产生不利的影响。在摩擦磨损的过程中, 表层的金属发生严重的塑性变形, 如图 7 所示。由于堆焊合金中 β 相的尺寸较粗大, 且多为形状不规则的块状及长条状(图 4), 与球状相相比, 这种形状的 β 相在表层金属的变形过程中更容易引起应力集中, 产生大量的孪晶(图 7a)。随着变形程度的增加, 裂纹便会在 β 相的边部萌生并扩展, 因此在图 7a 中可观察到一条明显的裂纹。当亚表层的裂纹彼此相交, 或扩展至合金的表面时, 导致

表层的材料从基体上大块剥落, 发生剥层磨损^[17], 形成剥落坑(图 8a, 8b)和片状磨屑(图 8c, 8d)。同时, 在摩擦磨损的过程中, 接触面处会产生大量的摩擦热, 而 β 相热稳定性较差^[18-20], 因此无法起到良好的强化和钉扎晶界的作用。此外, 在摩擦的过程中, 硬度远高于基体的大块 β 相从基体中脱落后, 有可能会粘附在材料和摩擦盘之间, 从而阻碍摩擦副的相对滑动, 加重材料的磨粒磨损^[21]。

在作者之前的研究中^[22]发现, 通过固溶处理使形状不规则的粗大 β 相溶解到基体中, 可提高堆焊合金的耐磨性。而在本实验中, 稀土元素 Y 的添加使粗大的 β 相的尺寸和数量明显减少(图 3), 从而减少了摩擦过程中表层金属中的应力集中, 降低了裂纹源的数量, 从而提高了合金的耐磨性。另一方面, 由相关文献可知^[23], 添加 Y 元素后, 合金中形成的 Al_2Y 的热稳定性远高于 β - $Mg_{17}Al_{12}$, 在摩擦磨损的过程中可以钉扎晶界, 阻碍晶界的迁移和滑动^[24], 从而减小了亚表层塑性变形层金属的厚度(图 7), 有利于提高合金的耐磨性。

2.2.2 磨损表面及磨屑形貌

图 8 为不同 Y 含量的合金摩擦磨损后的磨损表面及磨屑形貌。可以看出, AZ91 堆焊合金的磨损表面存在与滑动方向近似垂直的裂纹和多处尺寸较大的剥落坑(图 8a), 结合图 7a 中合金亚表层存在的裂纹, 判断其发生了较严重的剥层磨损。在这种磨损机制下, 大块的金属从基体上脱落, 形成尺寸较大的片状磨屑, 如图 8c 所示。同时, 合金表面还存在平行于摩擦方向的犁沟, 这是磨粒磨损的主要特征, 即在摩擦的过程中, 在磨盘表面微观凸起以及进入接触面间磨屑的切割和犁削作用下, 材料表层的金属发生脱落, 形成犁沟(图 8a, 8b)及颗粒状或条状的磨屑(图 8c)。

添加稀土 Y 元素后, 合金磨损表面的剥落坑尺寸明显变小(图 8b)。相对于未添加稀土元素的合金,

表 3 堆焊镁合金的硬度及导电率

Table 3 Macrohardness and electric conductivity of the tested alloys

Material	Macrohardness, HV/MPa	Conductivity/%IACS
AZ91	690	12.1
AZ91+1Y	657	11.1
AZ91+2Y	517	10.4

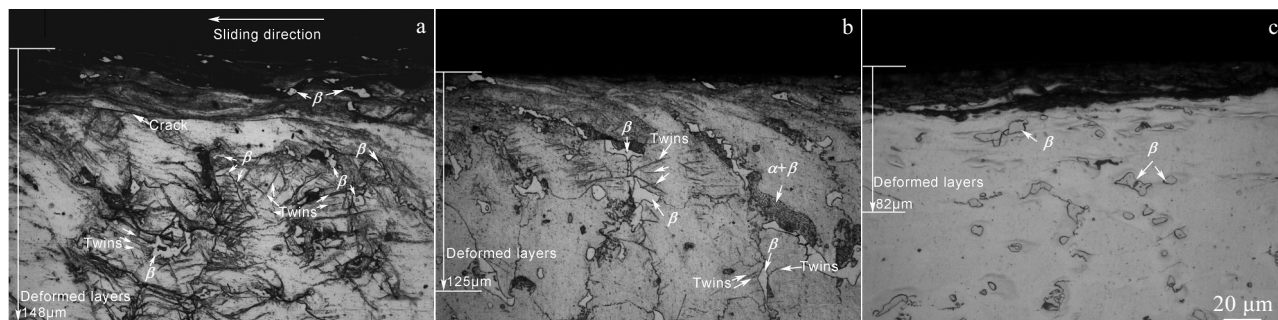


图 7 堆焊镁合金摩擦磨损后亚表层的微观组织

Fig.7 Micrographs of the subsurface of surfacing welding alloys after frictional wear: (a) AZ91, (b) AZ91+1Y, and (c) AZ91+2Y

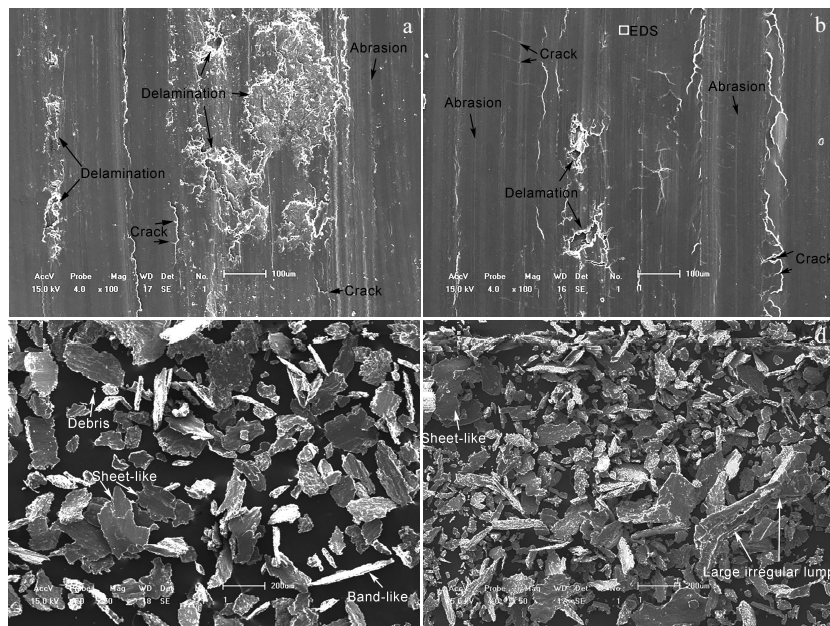


图 8 磨损表面及磨屑形貌

Fig.8 SEM morphologies of the worn surface and debris: (a, c) AZ91 and (b, d) AZ91+1Y

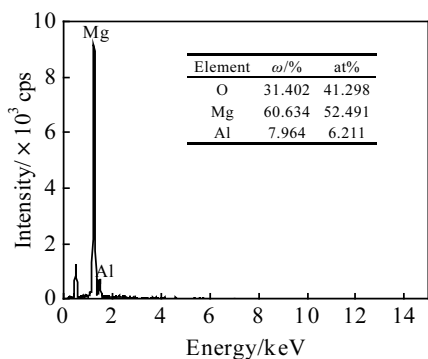


图 9 图 8b 中方框处 EDS 能谱

Fig.9 EDS result of the region depicted in Fig.8b

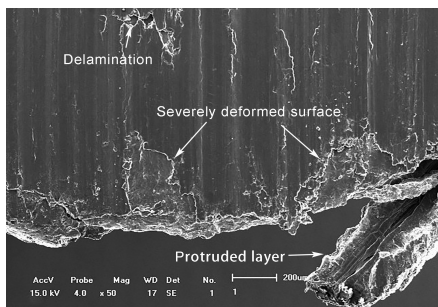


图 10 堆焊合金磨损表面的边部形貌

Fig.10 SEM image of protruded layers from the worn surface of the surfacing welding alloy

其所产生的磨屑的平均尺寸也有所减小(图 8c, 8d), 反映了合金耐磨性能的提高。使用 EDS 对其表面成分进行检测, 结果如图 9 所示。能谱结果中出现了较强的 O 元素峰, 表明合金在滑动的过程中发生了氧化磨损^[25]。

此外, 在 1%Y 含量的堆焊合金的磨屑中观察到了尺寸较大且形状不规则的磨屑(图 8d), 可能是在摩擦的过程中, 表层金属发生严重的塑性变形后被挤出摩擦样品的边缘所形成的, 如图 10 所示。

3 结 论

1) 在 Mg-Al-Zn 合金焊丝中添加稀土 Y 元素, 可以使焊丝堆焊后合金中的粗大 β -Mg₁₇Al₁₂ 相的尺寸和数量减少, 导致堆焊合金的宏观硬度降低。

2) 在 Mg-Al-Zn 合金焊丝中添加稀土 Y 元素, 可以减小亚表层变形层的厚度, 降低堆焊合金发生剥层磨损的程度, 提高堆焊合金的耐磨性。

3) 在本试验条件下, 堆焊 Mg-Al-Zn 合金的主要磨损机制有 3 种: 磨粒磨损、氧化磨损和剥层磨损。

参考文献 References

- [1] Dobrescu M, Vasilescu M, Dimitriu S. *Metalurgia International* [J], 2009, 14: 109
- [2] Mordike B L. *Journal of Materials Processing Technology* [J], 2001, 117(3): 391

- [3] Cao L, Wang Q, Wu Y *et al.* *Rare Metals*[J], 2013, 32(5): 453
- [4] Yan H, Wang Z. *Journal of Rare Earths*[J], 2016, 34(3): 308
- [5] Liu Y, Jin B, Shao S *et al.* *Tribology Transactions*[J], 2014, 57: 275
- [6] Wang Zhihu(王志虎). *Research on Transformation Behavior of β -Mg₁₇Al₁₂ Phase During the Solution and Aging Heat Treatment in AZ80 Magnesium Alloy*(AZ80 镁合金中 β -Mg₁₇Al₁₂ 相在固溶和时效时的转变行为)[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007
- [7] Celotto S. *Acta Materialia*[J], 2000, 48(8): 1775
- [8] Dadashpour M, Yeşildal R, Mostafapour A *et al.* *Journal of Mechanical Science and Technology*[J], 2016, 30(2): 667
- [9] Chye L T, Zamzuri M Z M, Norbahiyah S *et al.* *Advanced Materials Research*[J], 2013, 685: 102
- [10] Xu Zhen(徐振), Zhao Zhihao(赵志浩), Han Dongyue(韩东月) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(5): 1264
- [11] Meng H C, Ludema K C. *Wear*[J], 1995, 181-183(2): 443
- [12] Gupta N, Luong D D, Rohatgi P K. *Journal of Applied Physics*[J], 2011, 109(10): 103 512
- [13] Archard J F. *Journal of Applied Physics*[J], 1953, 24(8): 981
- [14] Han Qiuhua(韩秋华). *Effect of Precipitation Morphology of β Phase on Microstructure and Mechanical Properties of AZ91D Magnesium Alloys*(β 相沉积形貌对 AZ91D 镁合金组织和性能的影响)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011
- [15] Feng A H, Ma Z Y. *Scripta Materialia*[J], 2007, 56(5): 397
- [16] Lü Y Z, Wang Q D, Ding W J *et al.* *Materials Letters*[J], 2000, 44(5): 265
- [17] Sung H J, Heo N H, Kim S. *Metals and Materials International* [J], 2016, 22(6): 962
- [18] Min X G, Du W W, Xue F. *Chinese Science Bulletin*[J], 2002, 47(13): 1082
- [19] Yang Xiaomin(杨晓敏), Hou Hua(侯华), Zhao Yuhong(赵宇宏) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(4): 875
- [20] Zhou Dianwu(周惦武), Peng Ping(彭平), Zhuang Houlong (庄厚龙) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2005, 15(4): 546
- [21] Ramezani M, Ripin Z M. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2010, 51(1-4): 93
- [22] Chen Q Q, Li K Y, Liu Y Y *et al.* *Journal of Materials Research*[J], 2017, 32(11): 2161
- [23] Song Xiaojie(宋晓杰), Li Quanan(李全安), Chen Leilei(陈雷雷). *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2014(6): 1124
- [24] Meshinchi A K, Masoudi A, Khomamizadeh F. *Materials Science and Engineering A*[J], 2010, 527(7-8): 2027
- [25] Taltavull C, Torres B, López A J *et al.* *Wear*[J], 2013, 301(1): 615

Effect of Yttrium Content on Friction and Wear Resistance of Surfacing Welding Mg-Al-Zn Alloy

Chen Qingqiang¹, Zhao Zhihao², Wang Gaosong¹, Zhu Qingfeng¹, Tao Kai¹, Zhu Cheng¹

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Shenyang 110819, China)

(2. Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The effects of varying contents of yttrium on the dry sliding frictional and wear behavior of surfacing welding AZ91 magnesium alloys were investigated. The results demonstrate that the surfacing welding AZ91 alloy without yttrium exhibits poor wear resistance due to the massive intermetallic β -Mg₁₇Al₁₂ phases. With the addition of yttrium, the wear resistance is improved because of the reduction in size and quantity of the β phase, which reduces the alloy hardness and decreases the subsurface metal deformation caused by friction. Three primary wear mechanisms are observed: abrasion, oxidation and delamination.

Key words: AZ91; surfacing welding; friction and wear; microstructure

Corresponding author: Zhao Zhihao, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China, Tel: 0086-24-83681758, E-mail: neu_epm@foxmail.com