

高能电子束处理对 AZ91 镁合金耐磨性影响

赵 晖¹, 徐 玲¹, 陈立佳², 刘 正²

(1. 沈阳理工大学, 辽宁 沈阳 110168)

(2. 沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110023)

摘 要: 研究了 AZ91 镁合金电子束表面处理的耐磨性。结果表明, 在不同处理条件下, AZ91 镁合金表面分别形成了厚度为 20~60 μm 的表面熔凝层; 脉冲电流和脉冲次数对表面熔凝层厚度具有较大影响, 而加速电压的影响不大。随着脉冲电流的增加, $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相对应的衍射峰强度呈现上升趋势, 并且在处理过的 AZ91 镁合金中可看到 AlMg 亚稳相的存在。显微硬度测试结果表明, 处理层硬度比基体组织的硬度有所提高, 最表层可达到基体组织的 2 倍。摩擦系数和表面磨损量均有不同程度下降, 耐磨性明显提高主要是由于快速熔凝导致晶粒细化引起的。

关键词: AZ91 镁合金; 电子束; 表面处理; 微观组织; 硬度; 耐磨性

中图分类号: TG142.45

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)11-2048-05

高能电子束处理是一种新兴的材料表面改性方法^[1,2]。最初人们使用激光来实现材料表面改性, 但是在使用大功率激光器时, 能量利用率低、热影响区过大、参数控制灵活性差及材料表面对激光的高反射系数等缺点限制该技术进一步应用^[3,4]。近十多年, 人们发现大功率粒子束(电子束和离子束)同样可以被用来作为高能束流热源进行材料表面处理^[5]。与激光相比, 由于束流能量吸收(高达 90%)不依赖材料表面光学特性, 所以能量利用率显著提高。而且, 通过磁透镜的调节, 可以方便地获得不同截面形状及能量分布的粒子束。在众多大功率粒子束源中, 高能电子束系统具有更为实际的意义, 其优点是辐射安全、简化了高压装备及电子枪结构, 而且寿命长^[6~8]。

俄罗斯 TOMSK 强流电子研究所最早致力于脉冲电子束系统技术原理及电子束与各种材料相互作用特性研究。Proskurovsky 等人^[9]在对高能束流电子束机理研究的基础上, 利用这种技术对中碳钢、不锈钢、铝合金、钛合金和硬质合金等进行了探索性改性研究。日本、波兰、乌克兰等国家的研究者相继引进 TOMSK 研制强流脉冲电子束设备, 进行了材料表面改性方面的基础及应用研究, 该方面文献较多, 但涉及镁合金的相对很少, 电子束改性的可行性及有关机理尚不清楚。

近年来, 随着人们环保和节能意识的不断增强, 镁合金的用途不断增加, 镁合金较差的耐磨性及耐蚀性使其表面改性工作十分必要。本实验主要研究脉冲

电子束处理 AZ91 镁合金表面改性层的形貌, 相组成, 显微硬度及耐磨性, 以探索镁合金的电子束表面改性可行性。

1 实 验

试验采用从俄罗斯引进 SoLo-强流脉冲电子束处理设备, 输入功率为 5 kW。由于该设备的脉宽 30 μs , 实验只采用脉冲频率 1 Hz, 分别采用不同电流、电压和脉冲次数对 AZ91 镁合金进行脉冲电子束表面改性。电压范围 10~15 kV, 电流范围 100~180 A, 脉冲次数 1~15 次。

试样材料为铸态 AZ91 镁合金, 即 Mg-9Al-1Zn 合金, 合金实际化学成分(质量分数, %)为 8.3~9.7 Al、0.4~1.0 Zn, 余量为 Mg。该合金铸造组织在平衡状态下由基体相 α 相和在晶界析出的 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 相组成。试样尺寸 20 mm×20 mm×5 mm, 试样表面依次使用 320#、600#、800#、1000#、1200#、2000# 砂纸打磨后, 经过丙酮清洗、蒸馏水冲洗后吹干待用。

利用光学显微镜和日本岛津 EPM-810Q 电子探针仪观察 AZ91 镁合金表面及截面处理层组织。利用 D/max X 射线衍射仪分析处理层相组成。处理层截面显微硬度由 Knoop 硬度计测得, 载荷为 1 N。

滑动摩擦磨损试验是在往复式摩擦磨损试验机上进行, 采用球-盘接触方式, 上试样为直径 10 mm AISI52100 球, 硬度为 HRC60。下试样为镁合金盘, 直径为 24 mm。试验在室温(25 $^{\circ}\text{C}$, 湿度 45%)、干摩

收稿日期: 2008-11-19

作者简介: 赵 晖, 男, 1968 年生, 博士, 副教授, 沈阳理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168, 电话: 024-24682052, E-mail: zhaohui_1968@sina.com

擦条件下进行。试验条件: 载荷 5 N, 往复频率 5 Hz, 行程 2 mm, 摩擦时间 10 min。摩擦过程中, 实时记录摩擦系数。摩擦磨损试验后, 由表面粗糙度仪测出磨痕截面二维形貌, 计算出磨痕截面面积。磨损量 W 用磨损体积表示, 计算公式: $W=A \cdot L$, 式中 A 为磨痕横截面面积, L 为磨痕长度。

2 结果与分析

2.1 工艺参数对电子束处理层厚度的影响

图 1 为表面处理层厚度随电流变化关系图。电子束脉冲电压 15 kV, 脉冲次数都为 5 次, 电流分别为 120、150、180 A。可以看出, 当电压保持不变(15 kV), 脉冲次数不变(5 次)时, AZ91 镁合金试样表面处理层的厚度随脉冲电流强度的增大而增加, 同时, 应力影响区也逐渐增加。不过, 随着脉冲电流增加, 重熔层厚度并不是线性增加, 电流越大重熔层厚度增加越缓慢, 因为随着脉冲电流增加, 入射到材料表面的能量增加, 能量增加将直接导致镁合金表面的蒸发加剧^[10-12]。

当加速电压小于 10 kV, 电子束表面处理效果不明显, 本实验设备最高加速电压为 15 kV。所以, 选取脉冲电压分别为 10、12、15 kV。图 2 是处理层厚度随电压的变化关系图(电流 150 A, 脉冲次数 5 次)。从图中可以看出, 加速电压幅度越大, 处理层厚度增加幅度减小。图 3 处理层厚度随脉冲次数变化曲线。从图 3 可以看出, 当电流和电压保持不变时, 随着脉冲次数的增加, 表面熔凝层厚度随着增加, 表层下的热影响区也逐渐增加。当工艺参数为 15 kV, 150 A, 15 次时, 得到理想的处理层厚度。

综上所述, AZ91 镁合金材料在真空强流脉冲电子束表面处理过程中, 脉冲电流和脉冲次数对表面熔凝层厚度、热应力影响区、表面熔凝层晶粒尺寸大小具有决定性作用。而加速电压对以上方面影响不大。

2.2 电子束处理层表面形貌与相组成

2.2.1 电子束处理镁合金表面形貌

图 4 是 AZ91 镁合金 2 种条件(15 kV, 150 A, 5 次)和(15 kV, 150 A, 15 次)处理的扫描电镜照片。从中可以发现, 经强流脉冲电子束处理过的试样表面出现很多熔坑, 即典型的火山坑, 如图 4b, 这些熔坑是由于能量轰击在镁合金表面时使镁合金材料表面局部受热迅速熔化而蒸发, 同时造成应力不均, 表层下的杂质由于热应力作用从表面喷发出来, 犹如火山喷发, 形成火山坑。从微观上解释就是: 近表面层中显微结构的不规则性, 电子束注入造成的穿晶组织分离, 以及由于提高电流密度造成个别小喷出物的出现^[13-15]。其根本原因是基体上局部区域熔化温度低于基体的熔

点时出现的化合物、相组成的不均匀分布。当脉冲次数为 5 次时, 表面的缺陷很少; 脉冲次数为 15 次时, 由于脉冲次数增加, 沉积在材料表面的热量增加, 表面应力增加, 因此, 在表面形成微裂纹, 从 4b 中可以看出, 局部区域由于能量过大而使材料表面出现裂纹, 并且表面裂纹很多。从处理后的试样表面形貌特征可观察到在能量密度, 轰击次数不同条件下, 试样表面结构的差异。通过 2 个试样的照片比较, 可以得出, 轰击次数越多, 熔坑尺寸越大。试样处理表面都呈地貌形波状起伏, 这是金属材料在脉冲熔化模式下的典型特征。

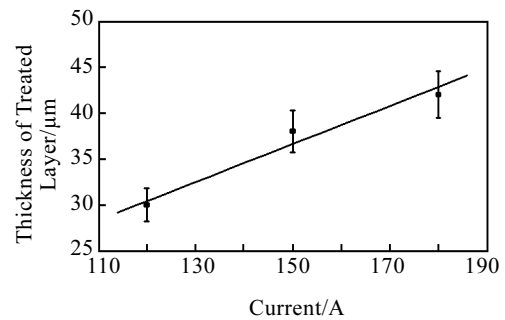


图 1 处理层厚度随电流变化曲线

Fig.1 Variation of thickness of treated layer with the current

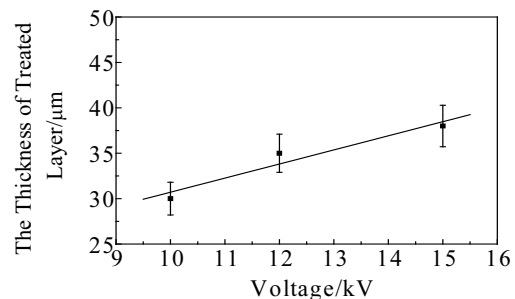


图 2 处理层厚度随电压变化曲线

Fig.2 Variation of thickness of treated layer with voltage

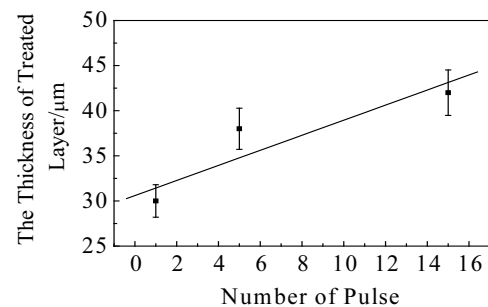


图 3 处理层厚度随脉冲次数变化曲线

Fig.3 Variation of thickness of treated layer with number of pulse

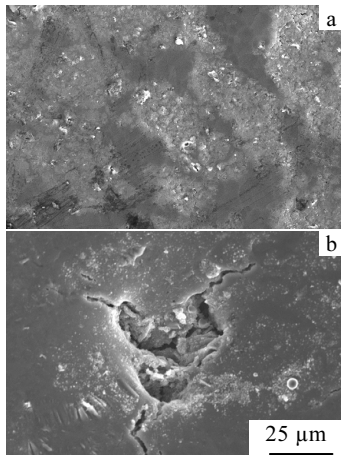


图 4 AZ91 镁合金强流脉冲电子束处理表面扫描电镜照片
Fig.4 SEM images of surface of AZ91 alloy by high energy electron beam irradiation: (a) 15 kV, 150 A, 5 pulses and (b) 15 kV, 150 A, 15 pulses

2.2.2 电子束处理镁合金截面形貌

图5为经脉冲电子束处理以后的镁合金截面形貌。从图中可以看出镁合金的原始组织为 α 相，周围包围着 α 相和 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 的混合组织。经过脉冲电子束处理，镁合金经历快速加热和快速冷却的过程，图中的白亮层为处理层，处理层厚度由于工艺参数不同而不同，但是处理层有共同特征，即处理层组织明显细化。细化层厚度随着电子束电流和脉冲次数增加而增加。电子束处理电流100~180 A，细化层厚度为25~60 μm 。

2.2.3 电子束处理镁合金表面相组成

图6是镁合金AZ91经强流脉冲电子束处理后处理层的XRD图谱。结果显示，AZ91镁合金的显微结构组织是由

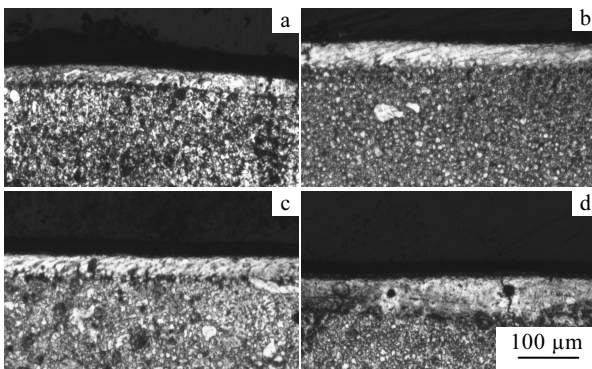


图 5 镁合金电子束处理截面金相照片
Fig.5 Transverse microstructures of AZ91 alloy after electron beam irradiation: (a) 120 A, 15 kV, 5 pulses, (b) 150 A, 15 kV, 1 pulses, (c) 150 A, 15 kV, 15 pulses, and (d) 180 A, 15 kV, 5 pulses

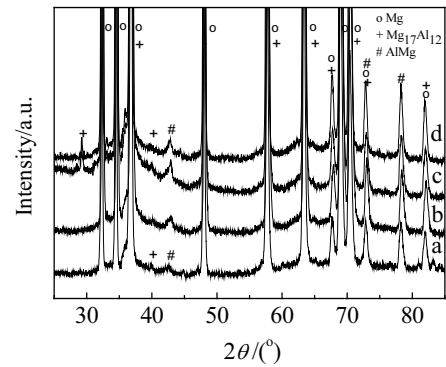


图 6 不同条件电子束表面处理的AZ91镁合金XRD图谱
Fig.6 XRD patterns of AZ91 alloy after electron beam irradiation under (a) 120 A, 15 kV, 5 pulses, (b) 150 A, 15 kV, 1 pulses, (c) 150 A, 15 kV, 15 pulses, and (d) 180 A, 15 kV, 5 pulses

α 相和 β 相(金属间化合物 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$)组成。该图表明随着脉冲能量增加， $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相对应的衍射峰强度呈现上升趋势，表明 β 相不断增加，并且在处理过的 AZ91 镁合金 XRD 图谱中可看到 Al Mg 亚稳相衍射峰^[16, 17]。

2.3 电子束处理镁合金表面硬度及耐磨性

图 7 是脉冲电流为 180 A 的截面硬度变化曲线。由于处理层的厚度为 60 μm ，试样处理层和基材显微硬度有明显不同，随着离最表层的距离越近，显微硬度值也渐渐增加。根据测得的硬度值可以看出，表面层的硬度为 228 MPa，基体材料硬度为 110 MPa，处理层硬度达到基材硬度 2 倍。这表明，经强流脉冲电子束轰击后的 AZ91 镁合金表面显微硬度有明显的提高，类似现象在激光处理表面也有报道。表面硬度提高不仅归因于电子束加工过程中快速熔凝导致材料表面晶粒细化，还与电子束处理后 β 相(高硬度)的增加有关。

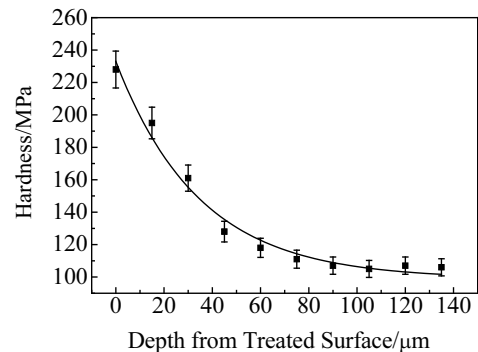


图 7 AZ91 镁合金表面处理层硬度与距离关系曲线
Fig.7 Hardness profile along the cross-section of AZ91 alloy after electron beam irradiation with a beam current of 180 A and 5 pulses

表1是AZ91镁合金经不同条件强流脉冲电子束处理前后平均稳态摩擦系数。从表中可看出, 经电子束处理的材料表面摩擦系数都有不同程度减小。图8显示了AZ91镁合金经不同参数电子束表面处理前后磨损量的变化。很明显, 电子束表面处理后AZ91镁合金磨损量较处理前均不同程度地减少。经电子束处理后AZ91镁合金和未经处理镁合金有着较强的抗摩擦磨损能力。比如, D试样的磨损量为 $3.8 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$, 仅仅是AZ91合金磨损量($6.6 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$)的57.5%。磨损量与硬度的关系可用经典Archard方程表示:

$$W = k \frac{L \cdot S}{H}$$

公式中给出了磨损量 W , 与载荷 L , 磨损距离 S 和硬度 H 有关。

磨损量减少是由于表面处理层显微硬度的增加, 而这正是因为电子束处理过程中材料表面快速熔凝导致晶粒细化以及高硬度的 β 相增加造成的。

表 1 AZ91 镁合金电子束处理前后摩擦系数

Table 1 Friction coefficient of AZ91 alloy before and after treatment

Treatment sample	AZ91	120 A, 15 kV, 5 pulses	150 A, 15 kV, 1 pulses	150 A, 15 kV, 15 pulses	180 A, 15 kV, 5 pulses
Friction coefficient	0.51	0.48	0.46	0.45	0.44

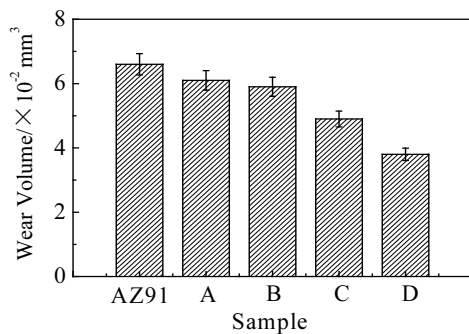


图 8 AZ91 镁合金电子束处理前后磨损量变化

Fig.8 Wear volume of AZ91 alloy treated by electron beam at (A) 120 A, 15 kV, 5 pulses; (B) 150 A, 15 kV, 1 pulses; (C) 150 A, 15 kV, 15 pulses; and (D) 180 A, 15 kV, 5 pulses

3 结 论

1) 利用高能电子束处理 AZ91 镁合金时, 表面可形成厚度达 20~60 μm 的表面熔凝层。

2) 脉冲电流和脉冲次数对表面熔凝层厚度具有较

大的影响, 而加速电压的影响不大; 随着脉冲电流的增加, $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相对应的衍射峰强度呈现上升趋势, 表明 β 相不断增加, 并且在处理过的 AZ91 镁合金中可看到 AlMg 亚稳相存在。

3) AZ91 镁合金经高能电子束处理后, 处理层硬度比基体组织硬度有所提高, 最表层可达到基体组织 2 倍。

4) 经不同条件电子束表面处理的 AZ91 镁合金, 摩擦系数和表面磨损量均有不同程度下降, 耐磨性明显提高。

参考文献 References

- [1] Xu Binshi(徐滨士). *New Technology for Surface Engineering* (表面工程新技术)[M]. Beijing: Guofang Industry Press, 2002
- [2] Robinson A G et al. *Chemical Physics Letters*[J], 1999, 312: 469
- [3] Petrov P. *Vacuum*[J], 1997, 48: 49
- [4] Wang Jinchang(王金昌). *High Current Laser and Ion Beam* (强激光与粒子束)[J], 1989(1): 1
- [5] Cong Xin(丛欣). *New Technology and Process*(新技术新工艺)[J], 1992(6): 7
- [6] Tan Jiajun(谭家骏). *Foreign Heat Treatment*(国外热处理)[J], 1994(4): 44
- [7] Minnucci J A, Little R G. *Heat Treatment of Metals*[J], 1980(6): 658
- [8] Chen Furong(陈芙蓉) et al. *Electron Technology*(电子工艺技术)[J], 2002, 23(2): 77
- [9] Proskurovsky D I. *J Vacuum Sci Techn*[J], 1998, 16(4): 2480
- [10] Sayegh G. *Heat Treatment of Metals*[J], 1980, 7: 1
- [11] An Yongchang(安永昌). *Foreign Metal Processing*(国外金属加工)[J], 1990(1): 32
- [12] Fan Yudian(范玉殿). *Processing of Electron Beam and Ion Beam*(电子束和离子束加工)[M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 1989
- [13] Zhang Bopeng(张伯鹏). *Machine Manufacture and Automatization*(机械制造及其自动化)[M]. Beijing: Renmin Jiaotong Press, 2003
- [14] Hao Shengzhi(郝胜智). *Vacuum and Low Temperature*(真空与低温)[J], 2001(2): 77
- [15] Liao Qianchu(廖乾初). *Enginry Materials Science and Technology*(兵器材料科学与工程)[J], 1988(3): 10
- [16] Hick A J. *Heat Treatment of Metals*[J], 1983(1): 102
- [17] Artinger D I. *3rd International Congress on Heat Treatment of Materials*[C]. Shanghai: HTM, 1983: 235

Effect of Pulsed High Energy Electron Beam Treatment on the Wear Resistance of AZ91 Magnesium Alloy

Zhao Hui¹, Xu Ling¹, Chen Lijia², Liu Zheng²

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

(2. Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: The effect of pulsed high-energy electron beam on the surface modification of AZ91 magnesium alloy has been studied. The results show that the re-melted coatings (20~60 μm in thickness) on the surface of AZ91 magnesium alloy has been obtained under different treatment conditions. It was found that the thickness of the melted surface layer varies with the electron beam current and numbers of pulses, but the voltage has a minimal effect. The intensity of the diffraction peak assigned to $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ increases with the increase of the electron beam energy, and a metastable AlMg phase has also been found from the XRD patterns of the treated AZ91 alloy. The treated surface layer exhibits a higher hardness than the AZ91 alloy, and the hardness of the topmost layer is two times as higher as the substrate. The friction coefficient and the wear volume of AZ91 alloy after electron beam treatment decrease obviously. The wear resistance of treated samples increases obviously, may be due to the high hardness from the grain refinement.

Key words: AZ91 magnesium alloy; pulsed high-energy electron beam; surface treatment; microstructure; hardness; wear resistance

Biography: Zhao Hui, Ph. D, Associate Professor, College of Material Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, P. R. China, Tel: 0086-24-24682052, E-mail: zhaohui_1968@sina.com