

镁合金表面激光熔覆 Al-Si/Al₂O₃-TiO₂ 复合 涂层界面特征及耐磨性

崔泽琴^{1,2} 王文先² 吴宏亮² 许并社^{1,2}

(¹新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024)
(²太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要 为提高 AZ31B 镁合金表面的耐磨性, 利用 5 kW 横流连续 CO₂ 激光器, 配制了质量比为 6:1 的 Al-Si/Al₂O₃-TiO₂ 复合粉, 在 AZ31B 镁合金表面进行了激光熔覆试验研究。通过光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)仪、能谱分析仪(EDS)分析了熔覆层的组织、界面结合及成分分布情况, 并利用显微硬度仪、磨损试验机测试了熔覆层的表面性能。结果表明, 激光熔覆复合涂层与基体达到了良好的冶金结合, 结合界面清晰可见, XRD 结果表明复合涂层由 Mg₁₇Al₁₂、Al₃Mg₂、Mg₂Si、Al₂O₃、TiO₂ 5 种化合物组成; 复合涂层最高硬度达 245 HV_{0.05}, 比基体(50 HV_{0.05})提高了约 4 倍; 由于陶瓷颗粒的镶嵌和镁铝金属间化合物的综合作用使得复合涂层的磨损性能也得到明显提高, 磨损量比原始镁合金减少了 81.4%。

关键词 光学制造; 激光熔覆; Al-Si/Al₂O₃-TiO₂ 复合涂层; 镁合金; 耐磨性

中图分类号 TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603020

Microstructure and Wear Resistance of AZ31B Magnesium Alloy by Laser Cladding with Al-Si/Al₂O₃-TiO₂ Powders

Cui Zeqin^{1,2} Wang Wenxian^{1,2} Wu Hongliang² Xu Bingshe^{1,2}

(¹Ministry of Education, Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials, Taiyuan, Shanxi 030024, China)
(²College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract To improve the wear resistance of AZ31B magnesium alloy, laser surface cladding with Al-Si and Al₂O₃-TiO₂ mixture powders (in the mass fraction ratio of 6:1) is investigated by a CO₂ laser. The microstructure, phase analyses and wear behavior of AZ31B modified is studied by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), X-ray diffraction (XRD) and wear methods. The XRD pattern shows that the coating is composed of Mg₁₇Al₁₂, Al₃Mg₂, Mg₂Si, Al₂O₃, TiO₂, etc. The average microhardness of the surface layer is significantly improved to 245 HV_{0.05}, as 4 times higher of that of the AZ31B substrate. The coating's excellent wear resistance is due to the recombination of embedding of ceramic particles and intermetallic compounds. The worn mass of the composite coating decreases by 81.4% compared with that of the substrate.

Key words optical fabrication; laser surface cladding; Al-Si/Al₂O₃-TiO₂ coating; magnesium alloy; wear resistance

OCIS codes 140.3390; 140.3470; 160.3900; 180.0180

收稿日期: 2011-03-23; 收到修改稿日期: 2011-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(51075293)和太原理工大学科技发展资金(K201014)资助课题。

作者简介: 崔泽琴(1977—), 女, 讲师, 博士研究生, 主要从事镁合金激光加工基础理论及应用技术等方面的研究。

E-mail: czqin9704@163.com

导师简介: 许并社(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事有色金属加工基础理论及应用技术等方面的研究。

E-mail: xubs@tyut.edu.cn

1 引 言

基于轻质高强易回收的优点,镁合金材料被誉为“21世纪最具发展前途的绿色工程结构材料”,因此,在汽车及航空航天等领域得到了广泛的应用^[1]。但镁合金表面耐磨、耐腐蚀性能较差是限制镁合金广泛应用的瓶颈^[2]。因此,如何提高镁合金的耐磨、耐腐蚀及耐热等综合性能已成为当今镁合金材料研究、发展的重要课题。有效的途径之一是对镁合金表面进行改性处理,在基体材料的表面形成相应的保护层^[3]。

目前,在镁合金表面改性方面开展的研究工作主要有扩渗合金化、气相沉积涂层、激光处理、金属镀层、阳极氧化、化学转化膜等方法^[4~9]。其中激光处理方法因其独特的优势已开始受到重视。该方法包括激光表面重熔、激光合金化和激光熔覆等,在镁合金表面熔覆 Al、Al-Si 等合金粉末方面的研究较多^[10,11],酌使其表面性能得到较大程度的改善。近几年由于陶瓷材料,如 SiC 和 Al₂O₃ 等具有高抗氧化性、高硬度、耐磨性好、高抗压强度等特性,研究者们为了继续提高镁合金的表面性能,又进一步开展

了在镁合金基体上激光熔覆陶瓷涂层的研究。但是由于镁合金和陶瓷材料互溶性差,因此直接在镁合金表面熔覆陶瓷涂层,势必导致结合界面结合强度降低^[12]。

金属基陶瓷复合涂层近几年得到广泛的应用与研究^[13~16]。为了提高镁合金表面的耐磨性,本文将与镁合金具有良好互溶性的 Al-Si 合金粉作为熔覆基体材料,掺入硬度高、耐磨粒磨损、韧性好、耐腐蚀的 Al₂O₃-TiO₂ 复合陶瓷粉,进行镁合金表面激光熔覆金属陶瓷复合涂层的试验研究,深入分析了复合涂层的微观组织、成分分布、相组成、界面特征及其磨损行为。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

试验所用基体材料为 10 mm 厚的轧制成型的 AZ31B 镁合金,其化学成分如表 1 所示。其晶粒为大小不均的等轴晶,晶粒尺寸为 20~60 μm,主要由 α-Mg 和 β-Mg₁₇Al₁₂ 组成。

表 1 AZ31B 镁合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of AZ31B magnesium alloy(mass fraction, %)

Al	Mn	Zn	Ca	Si	Cu	Ni	Fe	Other	Mg
2.5~3.5	0.2~1.0	0.6~1.4	0.04	0.10	0.01	0.001	0.005	0.30	Bal.

由于陶瓷粉末自身很难与镁合金直接相容的特点,选用了低熔点共晶粉 Al-Si 合金粉作为基体熔覆材料。该 Al-Si 共晶合金熔点约为 650 °C,热膨胀系数为 $2.4 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$;AZ31B 镁合金熔点约为 660 °C,热膨胀系数为 $2.52 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$,所以二者具有较好的物化相容性。很多前期研究也证实该涂层与基体之间能形成牢固的冶金结合,是镁合金激光表面改性的理想熔覆基体材料。图 1(a)是 Al-Si 合金粉的扫描电镜(SEM)形貌,其粒度为 1~30 μm。

陶瓷粉末的性能尽管与镁合金有比较大的差异,但是陶瓷粉末具有比较好的耐磨性、耐蚀性以及比较高的硬度,正好弥补镁合金自身的缺点。试验选用 Al₂O₃-TiO₂ 复合陶瓷粉末(Al₂O₃ 的质量分数为 60%,TiO₂ 的质量分数为 40%),此粉末为典型的陶瓷涂层材料,粉末熔点 1840 °C 左右,HRC60~70,硬度高、韧性好、耐腐蚀。图 1(b)是陶瓷粉末 Al₂O₃-TiO₂ 的 SEM 图,其平均粒度为 10~50 μm。

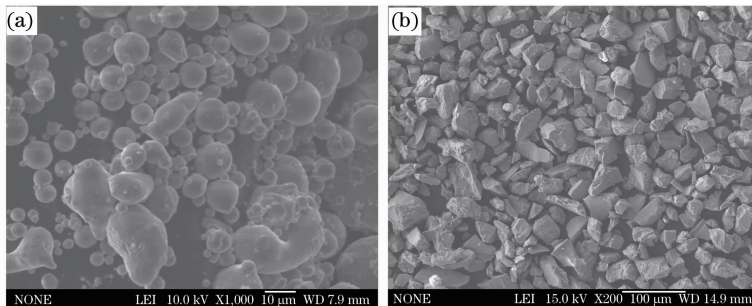


图 1 熔覆粉末的 SEM 图像。(a) Al-Si 合金粉,(b) Al₂O₃-TiO₂ 陶瓷粉

Fig. 1 SEM images of Al-Si powder (a) and Al₂O₃-TiO₂ powder (b)

将 Al-Si 合金粉和 Al₂O₃-TiO₂ 陶瓷粉以质量比 6:1 混合,以期能在镁合金表面制备性能良好的复合涂层。

2.2 试验方法

试验前,用粗砂纸去除镁合金板表面氧化膜,之后用丙酮清洗,去除油污。试验采用预置粉末法,熔覆层厚度约为 1 mm。激光熔覆利用 5 kW 横流 CO₂ 激光器进行,光斑直径为 3 mm,离焦量为 10 mm,试验过程中采用氩气保护,与激光束成 45° 角,保护气流量为 15 L/min。试验时,先进行单道熔覆,试验工艺参数为激光功率 1500~3500 W,扫描速度为 180~420 mm/min。优化工艺参数后,选用激光功率为 3000 W,扫描速度为 360 mm/min 进行多道搭接,搭接率为 30%。每一道熔覆结束后,待试板表面温度降至常温,再进行下一道的激光熔覆处理,以避免积聚过多热量使得镁基材过度熔解和合金粉的烧损而出现下塌现象。

激光熔覆后的试样沿横截面剖开,经打磨抛光后

制成金相试样,然后用体积比为 1:3 的硝酸乙醇混合溶液进行腐蚀,腐蚀时间为 5~6 s。利用 CMM220E 型光学显微镜和 JSM26700F 冷场发射电子显微镜观察其微观组织、界面形貌及成分分布;用 Y-2000 型 X 射线衍射(XRD)仪对复合涂层表面的物相结构进行定性和半定量分析;利用 SHIMADZUHMV22T 系列维氏显微硬度计(显微硬度)测试了试样横截面的显微硬度值,检验载荷为 50 g,加载时间 15 s;用 MS-T3000 摩擦磨损试验仪测试了复合涂层和基材表面的耐磨损性能。

3 结果与分析

3.1 复合涂层微观组织及界面特征

图 2 为试样横截面的微观组织形貌。在显微镜下测得复合涂层厚度约为 0.6 mm,界面清晰、结合良好,由表及里可分为 3 个区域,即熔覆区、过渡区和基体。图 2(a)为低倍形貌,图 2(b)、(c)、(d)分别为复合涂层上部、中部及界面处的显微形貌。

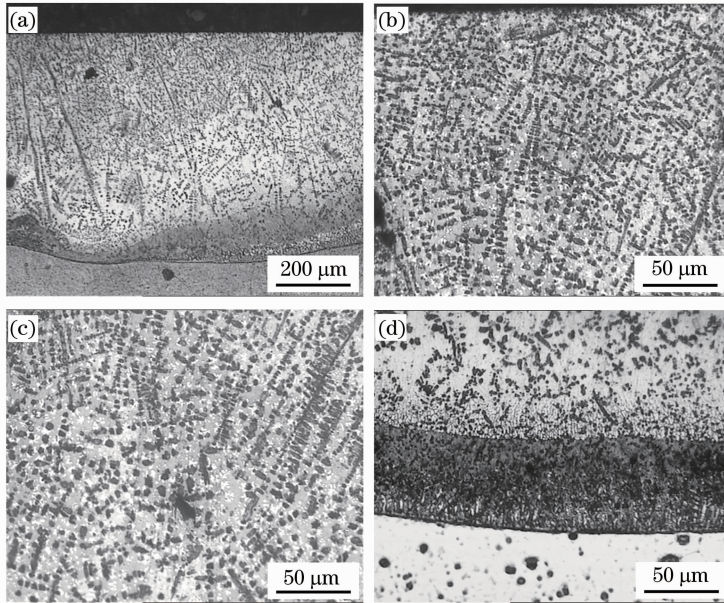


图 2 复合涂层试样横截面的微观形貌(激光功率 $P=3000$ W,扫描速度 $v=320$ mm/min)。(a)低倍形貌,(b)复合涂层上部,(c)复合涂层中部,(d)结合界面显微形貌

Fig.2 Microstructure of cross-section of the composite coating (laser power $P=3000$ W, scanning speed $v=320$ mm/min). (a) low magnified, (b) top, (c) middle, (d) interface

由图 2 可知,在灰色基体上弥散分布着大量黑色的树枝晶和块状晶,同时还形成了大量的白色析出相,且随着离表层距离的增加,黑色物质和白色析出相分布越来越少。这是由于溶质的富集而出现较大的成分过冷,从而导致高度分枝的树枝晶生成。树枝晶的生长主要受制于晶体生长的择优取向,只有那些与热流反方向一致或相近的晶体才能择优生

长,反之则会受到抑制。由于熔池上部散热有多种渠道,如基体、周围环境等,所以该区散热具有多方向性,只要某一微区晶体的择优取向与该区的散热方向一致,该晶体即可长大,故得到方向紊乱的树枝晶。另外,由于陶瓷颗粒密度小,激光熔覆过程中,熔池上部直接受激光照射,陶瓷颗粒有上浮的趋势,造成大部分 Al₂O₃-TiO₂ 熔化分解,从而使熔覆层

上部黑色物质分布致密。

为了进一步分析复合涂层的界面特征,在 SEM

下进行了观察,并对界面成分进行了分析,如图 3 所示。

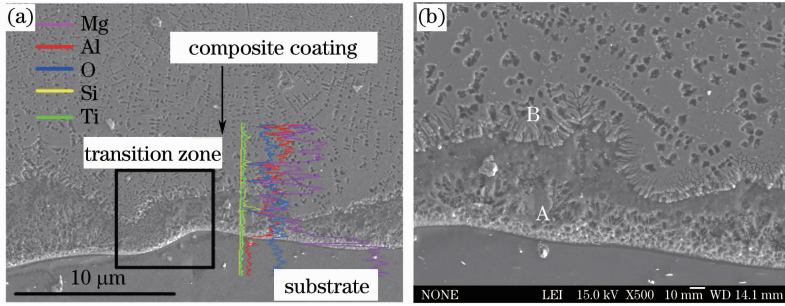


图 3 复合涂层的 SEM 照片。(a)线扫描结果,(b)界面微观形貌

Fig. 3 SEM images of laser cladding composite layer (a) and interface (b)

由图 3(a)可知,过渡区域由于多种金属间化合物的混合以及镁基体的大量溶入,其耐蚀性较差,在腐蚀液的侵蚀下,显示一条宽 $2.5 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 的区域。对界面处做了能谱分析仪(EDS)线扫描,如图中箭头方向所示。可以看出,这部分组织主要由 Mg、Al、O、Si、Ti 5 种元素组成,Mg 元素含量从熔覆层到基体依次升高,而 Al 元素则相反,从熔覆层到基体逐渐降低,说明从熔覆层中扩散到 Mg 基体中 Al 元素含量稀少;O、Ti 元素变化不是很明显;界面两侧的 Si 元素没有明显变化,而在过渡区域处 Si 元素峰值有明显的突起,说明在过渡区中存在较多的 Si 或者 Si 的金属间化合物。这说明复合涂层与基体达到了良好的冶金结合。为了进一步分析过度区域的组织形貌特点,对图 3(a)中方框位置处进行放大,如图 3(b)所示。由图可知,过渡区域的组织呈现不同的形貌,靠近基体一侧(见 A 区)呈“蜂窝”状结构,而 B 区呈现短小的树枝状结构。分析其原因是由于受熔池内温度梯度和液固界面前沿溶质非平衡分配规律的影响,使复合涂层最终的凝固组织呈现明显的梯度分布特征。

3.2 物相分析

利用 Y-2000 型 XRD 仪对 Al-Si/ Al_2O_3 - TiO_2 复合涂层的表面进行了物相分析,如图 4 所示。由图可知,复合涂层主要由 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 、 Al_3Mg_2 、 Mg_2Si 、 Al_2O_3 、 TiO_2 5 种物质组成。由于 Mg 合金熔点低,Al-Si 粉的热导率较高,同时陶瓷粉末的加入增大了对激光的吸收率,因而在激光加热过程中,由复合涂层传递给基材的热量足够使基材表层熔化形成熔池,处于熔池底部的 Mg 在流场和重力场的作用下从熔池底部向整个熔池中扩散,并占有一定的比例,结果使得复合涂层形成多种 Mg 金属间化合物的凝固组织。

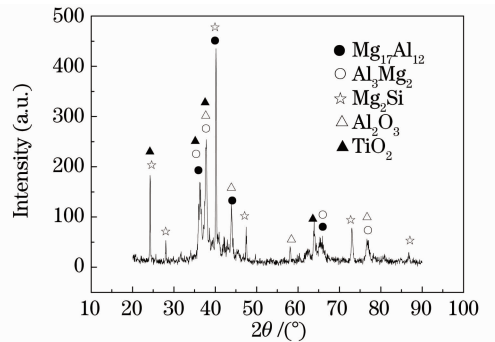


图 4 复合涂层表面 XRD 谱线图

Fig. 4 XRD results of the composite coating

3.3 显微硬度

图 5 为复合涂层的显微硬度分布曲线。由图可知,激光熔覆复合陶瓷涂层的显微硬度较基材 AZ31B 有明显提高,复合涂层的最高硬度达 $245 \text{HV}_{0.05}$,约为基体的 5 倍。这是由于激光处理后复合涂层中存在大量的金属间化合物和弥散分布的第二相陶瓷颗粒对基体起到强化作用,又由于激光快热急冷的特点,晶粒明显细化,起到细晶强化的作用,这有利于提高涂层的显微硬度,同时也有利于提高涂层的耐磨性。

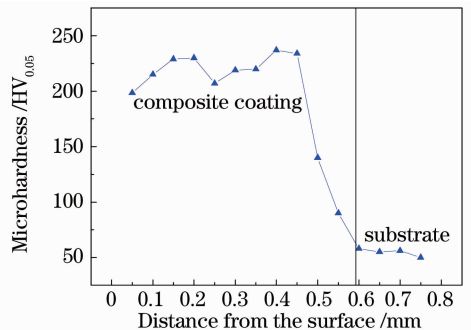


图 5 复合涂层横截面显微硬度分布曲线

Fig. 5 Curves of the microhardness of the composite coating in the cross-section

3.4 磨损性能

试验采用 MS-3000T 摩擦磨损试验机,对 AZ31B 镁合金基体和 3 种不同比例的复合涂层进行干摩擦试验,从磨损形貌、摩擦系数、磨损量 3 个方面对涂层的耐磨性进行了评价和分析。对磨试块为 $\phi 3$ mm 的 GCr15 钢球,载荷 5 N,对磨时间 15 min,转速 200 r/min。试块尺寸为 $\phi 15$ mm \times

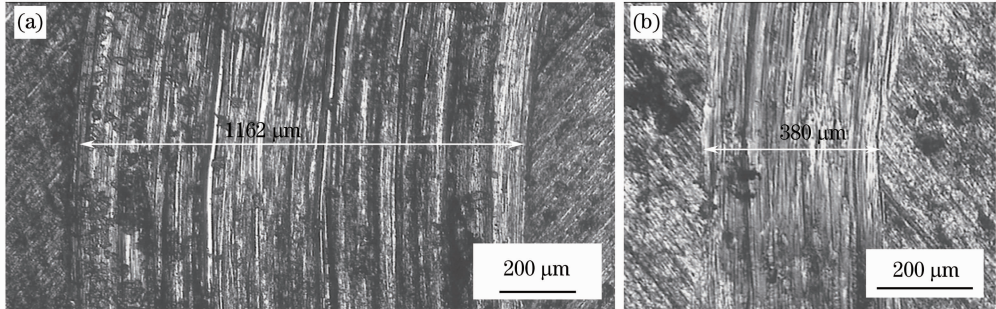


图 6 AZ31B 基体和复合涂层表面磨损形貌。(a)AZ31B 镁合金,(b)复合涂层

Fig. 6 Worn morphology of AZ31B substrate (a) and the composite coating (b)

(在干摩擦条件下,由于 AZ31B 镁合金表面的 Mg 和 Al 很容易形成 MgO 和 Al₂O₃ 薄膜,而它们的耐磨性较差,在连续外加接触应力的作用下极易脱落。一旦脱落的硬 MgO 和 Al₂O₃ 颗粒不能及时排出,将刺入基材表面而导致磨粒磨损,即出现深且宽的犁沟。另外,摩擦过程中所消耗的功至少 90% 以热的形式散发出来,而镁合金熔点又低,极易软化,粘附在钢球上,引起粘着磨损)。而对于复合涂层,由于 Al-Si 涂层的熔点低,在摩擦过程中,同镁合金基体一样,在高温下材料表面必然发生氧化,而这种氧化膜的耐磨性又差,在载荷下很容易破碎形成磨屑,堵塞在磨损表面,作为磨粒对材料表面进行磨损;另外,由于弥散分布的硬质陶瓷颗粒的存在,在摩擦过程中,摩擦表面的增强颗粒不仅承受挤压和犁划作用,同时由于切向载荷的作用而产生滚动的趋势,这样就会在颗粒与基体的界面处产生切应力,当此应力大于颗粒和基体的结合强度时,颗粒就会脱落,作为两摩擦面的第三体,对摩擦面造成犁划作用;增强颗粒对基体产生犁划作用时,在基体表面会产生犁沟槽,犁沟的边缘会突出表面,在随后的摩擦过程中,凸起边缘在载荷的作用下被压扁,最终形成细小颗粒及浅而窄的犁沟。

摩擦系数是衡量材料摩擦学性能的重要指标之一。在相同的条件下,摩擦系数越小,耐磨性越好;反之,则耐磨性越差。图 7 是镁合金母材和复合涂层的摩擦系数随时间的变化曲线图。

由图 7 可以发现,镁合金基体与复合涂层在刚

10 mm。

图 6 是 AZ31B 镁合金基体和复合涂层磨损试验后的磨损形貌图。可以看出,AZ31B 镁合金基体的磨痕宽度约为 1.16 mm,而复合涂层的磨痕宽度为 380 μ m,远远小于镁合金基体的磨痕宽度,并且犁沟深度较浅。这说明激光熔覆复合陶瓷涂层的 AZ31B 镁合金的耐磨性得到提高。

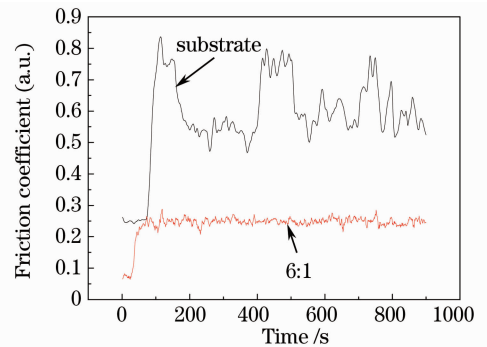


图 7 AZ31B 镁合金基体和复合涂层摩擦系数随时间的变化曲线

Fig. 7 Curves of friction coefficient with time of AZ31B substrate and laser composite layers

开始 1~2 min 内,试件与对磨件之间存在短时间跑合,这是由于刚开始试样表面具有一定的粗糙度,存在许多微凸体,实际接触面积很小,且实际接触应力远远大于名义接触应力,接触点处的金属发生塑性变形,使整体接触的宏观应力场变为分散的微观应力场,在这种微观应力作用下,摩擦表面上的微凸体发生形变,摩擦阻力增大,摩擦表面磨损较大并生热,导致摩擦系数增大且不稳定。

在跑合阶段之后,由图 7 可看出母材在磨损过程中系数比复合涂层的波动较大。分析其原因,是由于 Mg 合金基体表面很容易氧化,而形成 MgO 薄膜,该氧化膜耐磨性很差,摩擦过程中所消耗的功至少 90% 以热的形式散发出来,且 Mg 合金熔点又低,极易软化,粘附在钢球上,引起粘着磨损),随着

摩擦过程的进行,实际接触面积不断增加,因而,导致 Mg 合金基体在整个摩擦磨损过程中波动较大而不稳定,经计算,AZ31B Mg 合金基材平均摩擦系数约为 0.6。对于复合涂层,跑合阶段之后,摩擦系数波动较小,基本达到稳定,此阶段的摩擦主要是熔覆层与对磨球的摩擦,两摩擦件的接触面积增大,由于熔覆层中弥散分布的金属间化合物及硬质陶瓷颗粒在摩擦磨损过程中能够起到支撑作用和限制塑性变形的作用,因此,此阶段摩擦系数低,波动小,复合涂层的平均摩擦系数为 0.24。

用电子天平称磨损试样磨损前后的质量,在同等条件的摩擦环境下,AZ31B Mg 合金母材的磨损质量为 3.5×10^{-3} g 左右,而涂层的磨损量为 6.5×10^{-4} g,比原始镁合金减少了 81.4%。

综合以上 3 方面分析结果均可表明,Mg 合金表面熔覆复合陶瓷涂层后,其表面耐磨性得到较大的改善。

4 结 论

1)利用激光熔覆技术,在 AZ31B 镁合金表面制备了 Al-Si/Al₂O₃-TiO₂ 复合涂层。熔覆层与基体达到了良好的冶金结合,结合界面清晰可见,在熔覆层形成了大量的树枝状晶和块状晶,弥散分布着大量黑色的硬质陶瓷颗粒。

2)硬度测试表明,复合涂层硬度都有所提高,其最高硬度达 245 HV_{0.05},比基体(50 HV_{0.05})提高了约 4 倍,

3)通过分析复合涂层的磨损形貌、摩擦系数及磨损失量可知,涂层的磨损性能得到明显提高,磨损量分别比原始镁合金减少了 81.4%。复合涂层的磨损机制是以磨粒磨损为主,粘着磨损和氧化磨损为辅。

参 考 文 献

- Ding Wenjiang. Magnesium Science and Technology [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2007. 25~26
丁文江. 镁合金科学与技术[M]. 北京: 科学技术出版社, 2007. 25~26
- Yao Meiyi, Zhou Bangxin. Review of the progress in surface treatments for magnesium alloys[J]. *Materials Protection*, 2001, **34**(10): 19~21
姚美意, 周邦新. 镁合金耐蚀表面处理的研究进展[J]. 材料保护, 2001, **34**(10): 19~21
- Chen Yu, Xiao Zehui, Tan Xiangling. Research development of surface overlaying modification technology of magnesium alloys [J]. *Materials Review*, 2008, **22**(3): 90~93
陈 愚, 肖泽辉, 谭香玲. 镁合金表面熔覆改性技术的研究进展 [J]. 材料导报, 2008, **22**(3): 90~93
- Ma Youping, Xu Kewei, Pan Xide *et al.*. Effect of solid diffusion metallic cementation on properties of ZM5 magnesium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, (3): 191~194
马幼平, 徐可为, 潘希德等. 表面渗扩 Al、Zn 处理对 ZM5 镁合金的性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2005, (3): 191~194
- Guo Hongfei, An Maozhong, Liu Rongjuan. Conversion coating technology of magnesium and its alloys [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2003, **31**(8): 35~38
郭洪飞, 安茂忠, 刘荣娟. 镁及其合金表面化学转化处理技术 [J]. 轻合金加工技术, 2003, **31**(8): 35~38
- A. L. K. Tan, A. M. Soutar, I. F. Annergren *et al.*. Multilayer solgel coatings for corrosion protection of magnesium [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, **198** (1-3): 478~482
- H. Hoche, H. Scheerer, D. Probst *et al.*. Development of a plasma surface treatment for magnesium alloys to ensure sufficient wear and corrosion resistance[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, **174-175**: 1018~1023
- F. Stippich, E. Vera, G. Kwofl *et al.*. Enhanced corrosion protection of magnesium oxide coatings on magnesium deposited by ion beam assisted evaporation [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1998, **103-104**: 29~35
- Yu Gang, Liu Yuelong, Li Ying *et al.*. Corrosion and protection of magnesium alloys [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, **12**(6): 1087~1095
余 刚, 刘跃龙, 李 瑛等. Mg 合金的腐蚀与防护 [J]. 中国有色金属学报, 2002, **12**(6): 1087~1095
- Chen Changjun, Chang Qingming, Zhang Min *et al.*. Study of the behavior of laser alloying Al powder on ZM5 Mg alloy [J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(4): 261~268
陈长军, 常庆明, 张 敏等. ZM5 镁合金表面激光 Al 合金化行为的研究 [J]. 应用激光, 2007, **27**(4): 261~268
- P. Volovitch, J. E. Masse, A. Fabre *et al.*. Microstructure and corrosion resistance of magnesium alloy ZE41 with laser surface cladding by Al-Si powder [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, **202**(20): 4901~4914
- B. J. Zheng, X. M. Chen, J. S. Lian. Microstructure and wear property of laser cladding Al+SiC powders on AZ91D magnesium alloy [J]. *Opt. Laser Engng.*, 2010, **48**(5): 526~532
- Gao Yali, Wang Cunshan, Yao Man *et al.*. The resistance to wear and corrosion of laser-cladding Al₂O₃ ceramic coating on Mg alloy [J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253**(12): 5306~5311
- Huang Weirong, Xiao Zehui. Laser surface cladding of AZ91D magnesium alloy with Ni-based and WC powders [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3267~3271
黄伟容, 肖泽辉. AZ91D 镁合金表面激光熔覆 Ni 基+WC 合金涂层 [J]. 中国激光, 2009, **36**(12): 3267~3271
- Z. Mei, L. F. Guo, T. M. Yue. The effect of laser cladding on the corrosion resistance of magnesium ZK60/SiC composite [J]. *J. Materi. Processing Technology*, 2005, **161**(3): 462~466
- Huang Kaijin, Lin Xin, Chen Chi *et al.*. Microstructure and wear behaviour of laser-clad Zr-Cu-Ni-Al/TiC composites on AZ91D magnesium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 549~554
黄开金, 林 鑫, 陈 池等. AZ91D 镁合金表面激光熔覆 Zr-Cu-Ni-Al/TiC 复合粉末的组织与磨损 [J]. 中国激光, 2007, **34**(4): 549~554