

AZ81 镁合金表面固态扩渗 Al、Zn 渗层形成机理

刘纹序, 李秀兰, 周新军

(四川理工学院, 四川 自贡 643000)

摘要: **目的** 通过表面固态扩渗合金化技术获得金属扩渗涂层, 研究扩渗涂层的形成机理。 **方法** 在 390 °C 对 AZ81 镁合金表面固态扩渗 Al 和 Zn, 通过 X 射线衍射仪和光学显微镜, 对扩渗合金层的物相结构和形貌进行分析, 通过建立扩渗过程模型研究其扩渗形成机理。 **结果** 扩渗时间为 4~8 h 时, 合金扩渗层中除了 AZ81 镁合金的原始相 $\alpha\text{-Mg}+\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 外, 还会发生 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03} \rightarrow \text{Mg}_7\text{Zn}_3+\text{Mg}_2\text{Zn}_3+\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}+\text{AlMg}_2\text{Zn} \rightarrow \text{Mg}_{32}(\text{Al,Zn})_{49}+\text{AlMg}_4\text{Zn}_{11}+\text{AlMg}_2\text{Zn}$ 等变化。Al 和 Zn 初始阶段在 AZ81 镁合金表面的扩渗机理为空位扩散, Al 和 Zn 固溶于镁合金基体表面, Zn 原子首先达到最大固溶度, Mg 和 Zn 反应生成化合物。但在 390 °C 下扩渗, Mg 和 Zn 的化合物不稳定, 会发生分解, 形成更稳定的 Mg-Al-Zn 化合物。Mg-Zn 化合物出现后, 渗层的形成机理表现为空位扩散+反应扩散+熔化解, Mg-Zn 化合物的熔化解加速了扩散和反应扩散的进程。 **结论** AZ81 镁合金表面固态扩渗金属 Al 和 Zn, 在同一扩渗温度下, 随扩渗时间的延长, 渗层的厚度、相组成、大小、形貌逐渐发生变化, 扩渗合金层的主要形成机理由物理扩散转变为反应扩散。

关键词: 镁合金; Al; Zn; 固态扩渗; 形成机理

中图分类号: TG156.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)08-0036-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.006

Formation Mechanism of Al and Zn Coating by Solid Diffusion on AZ81 Magnesium Alloy Surface

LIU Wen-xu, LI Xiu-lan, ZHOU Xin-jun

(Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain the metal diffusion coating by the surface solid diffusion technology and study the formation mechanism of the diffusion coating. Solid diffusion Al and Zn was prepared on AZ81 magnesium alloy surface at 390 °C, the phase constituents and morphologies of the diffusion alloyed coating were analyzed by X-ray and optical microscope. And the diffusion formation mechanism was studied by building diffusion processing model. When the diffusion time changed from 4 h to 8 h, the alloy coating changed as follows except the original phases $\alpha\text{-Mg}+\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ in AZ81 magnesium alloy: $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03} \rightarrow \text{Mg}_7\text{Zn}_3+\text{Mg}_2\text{Zn}_3+\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}+\text{AlMg}_2\text{Zn} \rightarrow \text{Mg}_{32}(\text{Al,Zn})_{49}+\text{AlMg}_4\text{Zn}_{11}+\text{AlMg}_2\text{Zn}$. The mechanism of surface diffusion of Al and Zn on AZ81 magnesium alloy was vacancy diffusion at the initial stage. Al and Zn were dissolved in AZ81 magnesium

收稿日期: 2018-04-02; 修订日期: 2018-06-04

Received: 2018-04-02; **Revised:** 2018-06-04

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51701133); 四川省教育厅重点项目 (18ZA0348); 四川理工学院人才引进项目 (2017RCL07); 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室项目 (GK201703)

Fund: Supported by National Natural Science Youth Foundation Program (51701133), Sichuan Education Department Key Program (18ZA0348), Talent Introduction Program of Sichuan University of Science and Engineering (2017RCL07) and Sichuan Provincial Key Lab of Process Equipment and Control Program (GK201703)

作者简介: 刘纹序 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: LIU Wen-xu (1995—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 李秀兰 (1977—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面工程。

Corresponding author: LI Xiu-lan (1977—), Female, Doctor, Assistant professor, Research focus: surface engineering.

alloy matrix surface, Zn firstly reached to the matrix solid solubility and then Mg and Zn reacted to generate compounds. However, the Mg and Zn compounds were thermodynamically unstable and decomposition occurred at the diffusion temperature of 390 °C and the more stable Mg-Al-Zn compounds were formed. After the presence of Mg-Zn compounds, the formation mechanism of the diffusion coating was combined with vacancy diffusion, reaction diffusion and melt decomposition and the diffusion and reaction diffusion process were accelerated by melt decomposition of Mg-Zn compounds. The thickness, phase constituents, phase size and morphology of diffusion coating for solid diffusion Al and Zn on AZ81 magnesium alloy change gradually with prolonged diffusion holding time at the same temperature. The main formation mechanism of the diffusion coating changes to reaction diffusion from physical diffusion.

KEY WORDS: magnesium alloy; Al; Zn; solid diffusion; formation mechanism

镁合金具有质量轻、比强度高、电磁屏蔽性和阻尼减震性好、可回收等优点,被誉为“21 世绿色工程材料”,在汽车、电子通讯、航空等领域有很大的应用潜力^[1-4]。但镁合金的强度低、耐磨性能和耐腐蚀性能差等缺点,使其工业化应用受到很大限制。表面处理技术可以拓宽其应用领域。目前,镁合金常用的表面处理技术有:电化学镀^[5]、有机涂层^[6]、阳极氧化^[7]、化学转化膜^[8]、喷涂技术^[9]、气相沉积技术^[10]、高能束表面改性技术^[11]、离子注入技术^[12]、表面固态热扩渗技术^[13]等。固态扩渗法是把某些固态金属粉末与基材金属接触,在一定温度下保温一段时间,金属粉末与基材金属发生扩散,反应生成金属间化合物层,提高镁合金表面硬度和耐腐蚀性能的方法。该技术的突出特点是:渗层与基体金属之间为冶金结合,且结合强度高,渗层不易脱落或剥落,这是其他涂层方法,如电镀、喷涂、化学镀,甚至物理气相沉积技术,所无法达到的。

在镁合金表面热扩渗金属粉末,通常选用的扩渗剂有 Al+Zn^[14]、Al^[15]、Zn^[16]、Ce^[17]、Zn+Y^[18-19]等,选用最多的合金元素是 Al 或 Zn,可实现扩渗层与基体金属间良好的冶金结合,镁合金在保持自身性能的同时,还能有效改善表面耐磨、耐蚀性能。但在研究和应用过程中还存在一些问题:一是处理温度高,温度通常在 380 °C 以上,提高扩渗温度可加快元素的扩散,但表面扩渗层中的缺陷多,导致其耐蚀性往往达不到预期效果^[20-21];二是处理时间长,长时间高温处理会对基体组织产生不利影响^[22];三是在镁基合金表层所获得的扩渗层厚度不均^[23]。为了解决这些问题,对固态扩渗的研究大多集中在改变扩渗过程的热力学和动力学条件,对扩渗的工艺过程(扩渗时间、扩渗温度、扩渗环境等)进行控制,研究其制备工艺条件对渗层组织和性能的影响,而对扩渗过程中元素的扩散行为、扩渗涂层生长机制及镁合金基体/渗层界面反应特征等方面的研究较少。本文选择固态扩渗温度为 390 °C,采用 Al+Zn 混合渗剂在 AZ81 基体表面获得铝锌合金渗层,研究镁合金固态扩渗 Al、Zn 的形成机理。

1 试验

将 AZ81 镁合金线切割成 $\phi 20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的原始试样,经 800#、1000#、1500# 的 SiC 砂纸打磨后,在丙酮溶液中用超声波清洗,再烘干。渗剂为工业纯 Al 粉(粒度 25 μm ,纯度大于 99%)和 Zn 粉(粒度 25 μm ,纯度大于 99.5%),Al 粉和 Zn 粉按质量比为 1:1 进行混合。将 AZ81 镁合金试样置于内径 $\phi 22 \text{ mm}$ 的不锈钢管中,不锈钢管一端先用铁块堵住,然后放入 Al+Zn 粉末,在粉末上面放入 AZ81 镁合金试样后,在试样上面再放入 Al+Zn 粉末,最后用铁块把不锈钢管另一端压实。将装有渗剂和 AZ81 镁合金试样的不锈钢管置于电阻炉中,加热至 390 °C 后分别保温 4、6、8 h 进行扩渗。试样取出空冷后,经超声波清洗以去除表面粘附的铝粉和锌粉,用线切割把试样从中心切开,选取其中一块试样的切开面作为研究对象,采用光学显微镜观察其界面组织,使用 KY-2000 型 X 射线衍射仪对渗层进行物相分析。

2 结果与分析

2.1 渗层组织分析

图 1 为 AZ81 镁合金在 390 °C 下扩渗不同时间的扩渗界面组织特征,可知随扩渗时间的延长,渗层的厚度增加。图 1a 和图 1b 分别是扩渗时间为 4 h 时不同放大倍数下扩渗界面处的显微组织照片,发现 AZ81 镁合金表面的渗层较薄,基体和渗层界面参差不齐,出现白亮色的大块状物质。图 2 为 XRD 衍射分析结果,试样除了 AZ81 镁合金中的 $\alpha\text{-Mg}$ 和 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相(a 曲线)外,还出现了 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 相(b 曲线),因此可判断白亮色的块状物质为 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 相。

图 1c 是扩渗时间为 6 h 时界面处的扩渗形貌,渗层组织与基体的结合界面较光滑,白亮色的大块状化合物消失。图 1d 是界面处局部放大 100 倍的光学显微照片,组织中出现了大小和形状各不相同的物质。图 2 中的 c 曲线为扩渗 6 h 的 XRD 图谱,可知

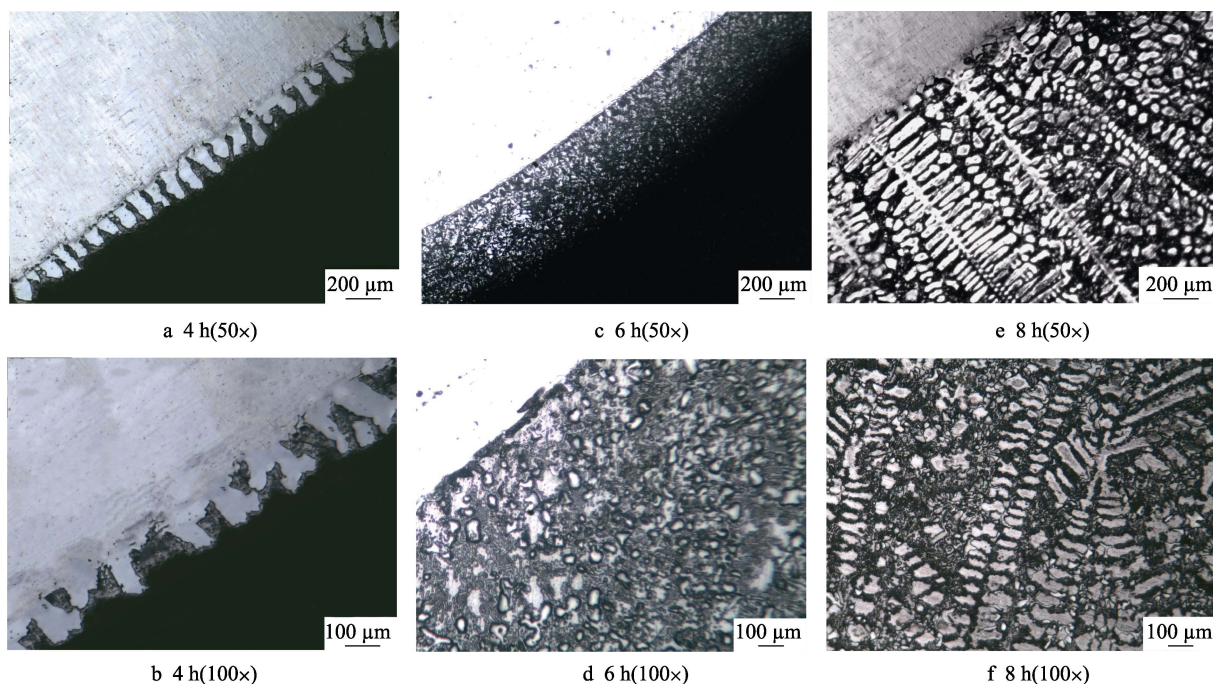
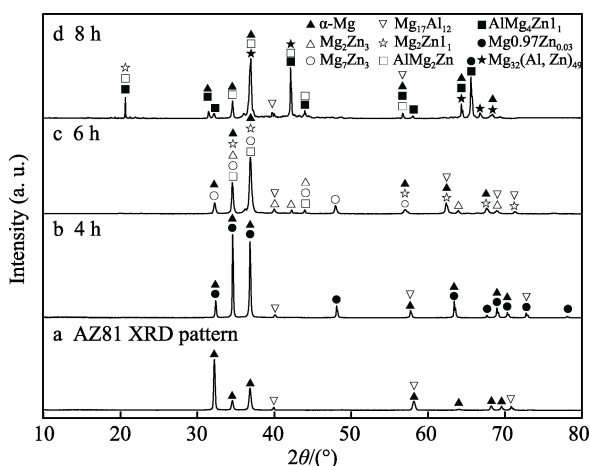


图1 390 °C扩渗不同时间 AZ81 表面 Al、Zn 共渗层组织金相照片

Fig.1 Optical microscope photographs of Al and Zn coating on AZ81 magnesium alloy at 390 °C for different diffusion time

图2 390 °C扩渗不同时间 AZ81 镁合金渗层 XRD 图谱
Fig.2 XRD patterns of diffusion coating on AZ81 magnesium alloy treated at 390 °C for different time

$\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 相消失, 试样又出现了 4 种新相: Mg_7Zn_3 、 Mg_2Zn_3 、 $\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$ 和 AlMg_2Zn 。由此可判断 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 是扩渗的亚稳相, 当条件适宜时会发生转变。扩渗时间延长到 8 h (见图 1e、f), 可观察到粗大且连续的树枝晶, 在树枝晶间还夹杂着白色块状物质, 在白色块状物质和树枝晶间的黑色区域, 出现了更细小的白色点状物 (如图 1f 界面处), 经 XRD 检测分析 (图 2 中的 d 曲线) 发现, 渗层中主要存在三种相: $\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$ 、 $\text{AlMg}_4\text{Zn}_{11}$ 和 AlMg_2Zn 。由图 2 中的 c 曲线和 d 曲线及金相观察结果可判断, 在扩渗时间为 6~8 h 内, AlMg_2Zn 未发生分解, 而 Mg 和 Zn 组成的化合物发生了分解, 分解后的 Al、Zn 原子与 Mg 结合形成了 Mg、Al、Zn 的化合物。

2.2 扩渗层形成机理

在扩渗温度下, Al 和 Zn 原子具有一定的活性, 随着扩渗时间的延长, AZ81 镁合金表面的扩渗层厚度不断增加。Al、Zn 粉末能在镁基体上形成扩渗层, 主要是扩渗剂元素和 AZ81 镁合金中的浓度存在差异, 在浓度差的驱使下, 渗剂原子 Al、Zn 向镁基体中扩散, AZ81 镁合金基体表面成分、组织、物相、扩渗层厚度等不断发生变化。温度不同, 原子在固态金属中的扩散途径和方式不同, 在高温 ($1 \sim 0.77T_f$, T_f 为熔点) 条件下, 原子扩散主要在点阵中扩散, 即体扩散; 当温度小于 $0.5T_f$ 时, 主要在表面和晶界扩散^[24]。在扩渗温度为 390 °C 的条件下, Al 和 Zn 在 AZ81 镁合金中的扩散属于高温扩散, 主要扩散方式为体扩散。扩渗初期, Al 和 Zn 原子在 Mg 中的扩散机制为空位扩散机制。Mg、Al、Zn 均为金属原子, 且半径相差不大, Mg、Zn、Al 的原子半径分别为 0.160、0.139、0.143 nm^[25], Al 和 Zn 原子首先在 AZ81 镁合金基体表面形成置换固溶体, Al 和 Zn 原子进入 Mg 基体中是通过空位的迁移来实现的。空位扩散时所需的能量由两部分组成: Al、Zn 原子的跃迁激活能和空位形成能。Zn 和 Al 与 Mg 原子的半径差分别为 13.13% 和 10.63%, Zn 与 Mg 原子的尺寸差别较大, Zn 进入镁晶体中引起的点阵畸变大, 固溶度小。扩渗时间相同时, Zn 在 Mg 中先达到最大固溶度。分析 Zn 的扩散速度, Zn 在镁中的畸变能大, 扩散激活能也大, 且扩散系数小, 相对于 Al 原子, Zn 的扩散速度较慢。由于尺寸因素, 使得 Zn 在 Mg 中的固溶度较小和扩散速度降低, 造成 Zn 原子在 Mg 基体表

面首先达到最大固溶度。随着 Zn 的再扩散, Zn 和 Mg 反应形成了新相, 由 XRD 结果可知, 形成了 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 相, 如图 2 中的 a 曲线所示。在 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 相形成之前, Zn 的扩散速度影响整个扩散进程。

$\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 形成初期, 由于 Zn 原子参与了化合物的形成, 因此化合物周围的 Zn 原子缺乏, 浓度梯度大, 原子扩散不是影响反应扩散速度的主要因素, 反应扩散的速度主要受生成 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 化合物反应速度的影响。根据文献^[26], $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 的熔点低, 在 350 °C 就已经分解, 所以在 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 相形成的同时, 也会慢慢熔化消失。如果扩散反应形成 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 相的速度超过 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 相熔化的速度, 则能观察到有 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 相的存在, 扩渗 4 h 时, $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 相还能稳定存在。但随着时间的延长, 扩渗时间为 6 h 时, $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 熔化消失, 如图 2 中 c 曲线。在 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 熔化分解区域, Zn 原子浓度增加, 有利于固相反应的进行, Zn 与 Mg 结合形成了新物相 (如 Mg_7Zn_3 、 Mg_2Zn_3 和 $\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$), Mg、Zn 和 Al 也形成了 AlMg_2Zn 。在 4~6 h 内, 相之间存在反应扩散与熔化分解之间的竞争, 亚稳相的分解加速了反应扩散。

扩渗时间为 8 h, 扩渗层由 Mg、Al、Zn 的三元化合物组成, Zn 和 Mg 所组成的二元化合物完全消失。随着扩渗时间的延长以及亚稳相的熔化, Al 和 Zn 原子的活动能力增强, Al、Mg 和 Zn 原子发生复杂的物理和化学变化。在扩渗 6 h 的渗层中, Mg_7Zn_3 相也不稳定, 容易分解^[27], 当温度在 317~325 °C 之间就会发生分解^[28], 分解后通过反应逐步形成 Mg_2Zn_3 。平衡条件下, Mg_2Zn_3 可以在 416 °C 以下存在。但相关研究也表明, 当加热温度在 400 °C 左右时, Mg_2Zn_3 溶解于基体中^[29]。在本实验条件下, Mg_2Zn_3 在 390 °C 下保温 8 h 就已经发生了分解, 而保温 6 h 时还存在 $\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$ 相, 且在 390 °C 长时间保温, $\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$ 也会发生分解。Zn-Mg 二元化合物分解后, 形成了新的 Mg、Al、Zn 三元化合物 $\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$ 和 $\text{AlMg}_4\text{Zn}_{11}$, 而 AlMg_2Zn 相仍然保留在渗层中。所以在 6~8 h 范围内, 反应扩散成为影响渗层的重要因素。

2.3 扩渗过程分析

图 3 为 Al 和 Zn 在 AZ81 镁合金中的扩渗过程。图 3a 为扩渗的初始阶段, Al 和 Zn 首先吸附在 Mg 基

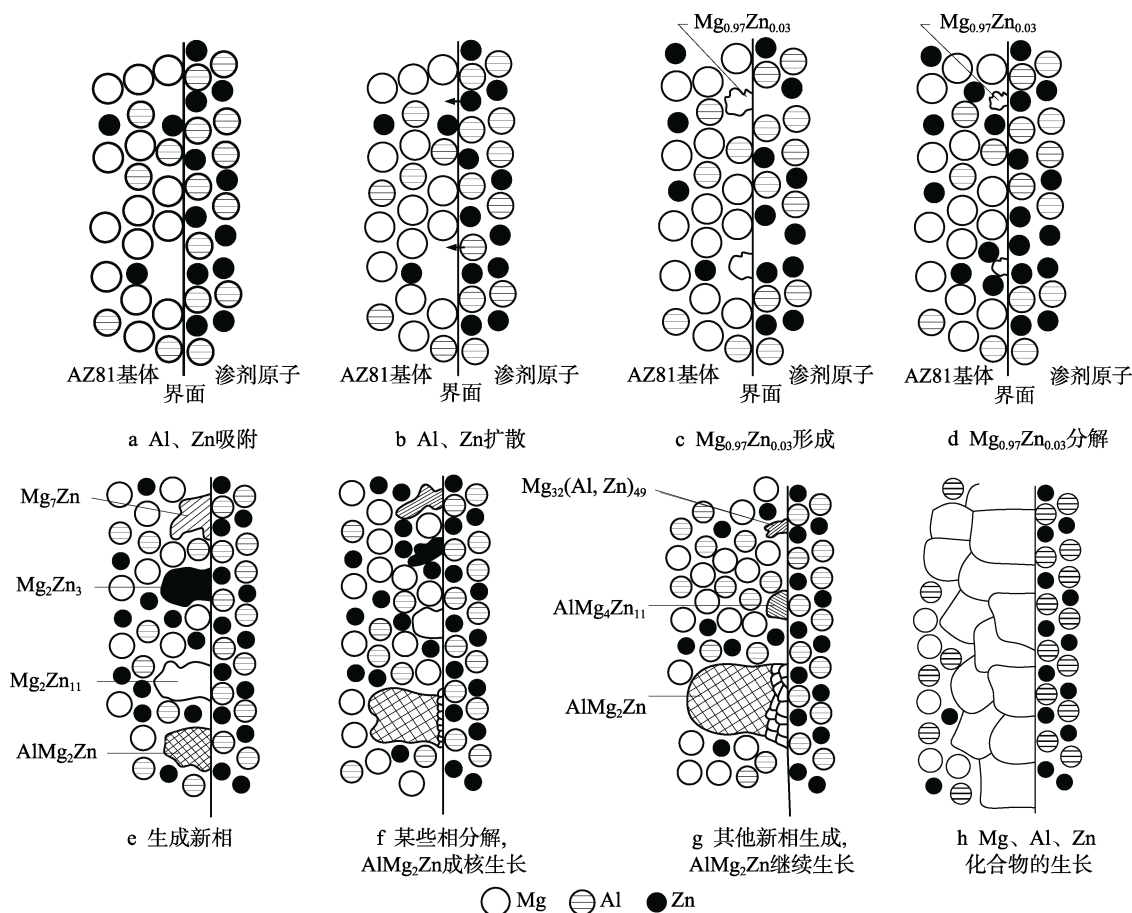


图 3 Al、Zn 扩渗过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of Al and Zn diffusion processing: (a) The adsorption of Al and Zn, (b) Al and Zn diffusion, (c) $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ formation, (d) $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ decomposition, (e) The presence of new phases, (f) The decomposition of some phases and AlMg_2Zn growth and nucleation, (g) The presence of other new phases and AlMg_2Zn continued growth, (h) The growth of Mg, Al, Zn compounds

体表面。图 3b 表明,随着保温时间的延长,活性原子 Al、Zn 以空位扩散的方式向 Mg 基体中扩散,增加了 Al、Zn 原子在 AZ81 镁合金表面的固溶度,Zn 原子扩散速度慢,在同一温度、同一时间的条件下,Zn 原子的扩散距离没有 Al 原子的扩散距离长,且扩散进 Mg 基体中的 Zn 原子没有 Al 原子多。图 3c 表明,当 Zn 原子超过在 Mg 中的最大固溶度后,形成了 $Mg_{0.97}Zn_{0.03}$ 化合物。图 3d 表明, $Mg_{0.97}Zn_{0.03}$ 形成后,Al 和 Zn 原子继续向 Mg 基体扩散,在 $Mg_{0.97}Zn_{0.03}$ 和 AZ81 镁合金表面之间的区域,由于 Zn 参与反应并形成了 $Mg_{0.97}Zn_{0.03}$ 化合物,造成该微区间的浓度梯度增加,Zn 原子的扩散速度比未形成化合物时的快,但同时 $Mg_{0.97}Zn_{0.03}$ 也会分解,分解后, $Mg_{0.97}Zn_{0.03}$ 周围的 Zn 和 Al 浓度高于其他微区。图 3e 表明,随着 $Mg_{0.97}Zn_{0.03}$ 的分解直到消失, Mg_7Zn_3 、 Mg_2Zn_3 、 Mg_2Zn_{11} 和 $AlMg_2Zn$ 逐渐形成。图 3f 表明,由于 Mg-Zn 的化合物在 390 °C 均不稳定且发生分解,造成 Mg_7Zn_3 、 Mg_2Zn_3 和 Mg_2Zn_{11} 相周围的 Zn 和 Al 浓度进一步升高, $AlMg_2Zn$ 继续长大,同时在界面处又有新的小晶粒形成。图 3g 表明,当 Mg、Al 和 Zn 的浓度达到形成各自化合物的程度时,形成了 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 和 $AlMg_4Zn_{11}$ 新相,同时 $AlMg_2Zn$ 继续生长,界面处的小晶粒慢慢长大,最后生成不同形态的相(如图 3h)。

3 结论

1) AZ81 镁合金在 390 °C 固态共渗 Al 和 Zn 粉末,随着扩渗时间的延长,渗层厚度增加,渗层中的物相及组织形貌不断发生变化。保温 4 h 的渗层主要由 $Mg_{0.97}Zn_{0.03}$ 相组成,保温 6 h 的渗层中出现了 Mg_7Zn_3 、 Mg_2Zn_3 、 Mg_2Zn_{11} 和 $AlMg_2Zn$ 相,保温 8 h 的渗层主要由 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 、 $AlMg_4Zn_{11}$ 、 $AlMg_2Zn$ 相组成。

2) 固态扩渗初始阶段,Al 和 Zn 的扩渗主要表现为物理吸附和空位扩散机制,Zn 原子的扩散速度相对较慢,这是影响扩渗进程的主要因素;渗层中出现的 Mg、Zn 化合物为亚稳相,随保温时间的延长,亚稳相会分解,渗层中一旦出现 Mg、Zn 化合物,扩渗机制表现为空位扩散、反应扩散和分解反应。

参考文献:

- [1] 李明月. 压铸 AM50 镁合金汽车座椅骨架的设计及组织和性能研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2017.
LI Ming-yue. The design microstructure and mechanical properties of die casting AM50 magnesium alloy automobile seat frame[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2017
- [2] 章珏, 梁金, 刘红霞. 镁合金表面处理技术的进展[J].

- 轻合金加工技术, 2014, 42(3): 19-23.
- ZHANG Jue, LIANG Jin, LIU Hong-xia. Progress of surface treatment for magnesium alloys[J]. Light alloy processing technology, 2014, 42(3): 19-23.
- [3] 赵康培, 于彦东. 镁合金通讯件压铸模浇注系统的设计与充型模拟[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2003, 8(6): 4-6.
ZHAO Kang-pei, YU Yan-dong. Design and filling simulation of gating system for die casting die of magnesium telecommunication part[J]. Journal of Harbin University Science and Technology, 2003, 8(6): 4-6.
- [4] 丁文江, 付彭怀, 彭立明. 先进镁合金材料及其在航空航天领域中的应用[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(2): 103-109.
DING Wen-jiang, FU Peng-huai, PENG Li-ming. Advanced magnesium alloys and their application in aerospace [J]. Spacecraft environment engineering, 2011, 28(2): 103-109.
- [5] 秦铁男, 马立群, 姚妍. AZ31 镁合金在化学镀镀液中的电化学行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(9): 1586-1591.
QIN Tie-nan, MA Li-qun, YAO Yan. Electrochemical behavior of AZ31 wrought magnesium alloys in the solution of electroless nickel phosphorus plating[J]. Rare metal materials and engineering, 2012, 41(9): 1586-1591.
- [6] 沟引宁, 张丁非, 易丹. 氨基酸类有机添加剂对镁合金阳极氧化的影响及其作用机制研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(4): 1103-1109.
GOU Yin-ning, ZHANG Ding-fei, YI Dan. Effect of amino acid on the anodic oxidation of magnesium alloy and its mechanism[J]. Rare metal materials and engineering, 2017, 46(4): 1103-1109.
- [7] 任晓莉, 曹娜娜, 王桂香. AZ31 镁合金阳极氧化膜的 Na_2SnO_3 封孔工艺[J]. 电镀与环保, 2016, 36(6): 37-40.
REN Xiao-li, CAO Na-na, WANG Gui-xiang. Sealing of anodic oxide film on AZ31 magnesium alloy using Na_2SnO_3 [J]. Electroplating and pollution control, 2016, 36(6): 37-40.
- [8] JIANG Yong-feng, ZHOU Hai-tao, ZENG Su-ming. Microstructure and properties of oxalate conversion coating on AZ91D magnesium alloy[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2009, 19(6): 1416-1422.
- [9] 陈杰, 马冰, 刘光. 镁合金表面冷喷涂纳米 WC-17Co 涂层及其性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(3): 74-80.
CHEN Jie, MA Bing, LIU Guang. Preparation and properties of cold sprayed nano WC-17Co coating on magnesium alloy[J]. China surface engineering, 2017, 30(3): 74-80.
- [10] YAMAMOTO A, WATANABE A, SUGAHARA K. Improvement of corrosion resistance of magnesium alloys by vapor deposition[J]. Scripta materialia, 2001, 44(7): 1039-1042.
- [11] YANG Y, WU H. Improving the wear resistance of AZ91D magnesium alloys by laser cladding with Al-Si powders[J]. Materials letters, 2009, 63(1): 9-21.
- [12] 陶学伟, 王章忠, 巴志新. 镁合金离子注入表面改性技术研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(4): 112-115.
TAO Xue-wei, WANG Zhang-zhong, BA Zhi-xin. Research progress in ion implantation technique for surface modification of magnesium alloys[J]. Materials review,

- 2014, 28(4): 112-115.
- [13] MA You-ping, XU Ke-wei, WEN Wei-xin. The effect of solid diffusion surface alloying on properties of ZM5 magnesium alloy[J]. Surface and coatings technology, 2005, 190(2): 165-170.
- [14] SUN An, SUI Xiao-ming, LI Hai-tao. Interface microstructure and mechanical properties of zinc-aluminum thermal diffusion coating on AZ31 magnesium alloy[J]. Materials and design, 2015, 67(15): 280-284.
- [15] 楚志兵, 吕阳阳, 唐宾. 表面渗铝改性镁合金的轧制组织性能[J]. 复合材料学报, 2014, 32(5): 1374-1380.
- CHU Zhi-bing, LYU Yang-yang, TANG Bin. Structure and properties on surface of aluminizing modification magnesium alloy in rolling[J]. Acta materiae compositae sinica, 2014, 32(5): 1374-1380.
- [16] 程旭艳. AZ91D 镁合金固态热扩渗锌及其耐腐蚀性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- CHENG Xu-yan. AZ91D magnesium alloy by solid thermal expansion zinc impregnation and research of corrosion resistance[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [17] 韩宝军, 古东懂, 何琼. AZ91D 镁合金表面扩渗 Ce 组织及耐蚀性能[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(8): 157-161.
- HAN Bao-jun, GU Dong-dong, HE Qing. Microstructure and corrosion resistance of AZ91D magnesium alloy by cerium surface diffusion[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2016, 37(8): 157-161.
- [18] WANG Hong-xia, YU Bin, WANG Wei-wei. Improved corrosion resistance of AZ91D magnesium alloy by a zinc-yttrium coating[J]. Journal of alloys and compounds, 2014, 582: 457-460.
- [19] 余彬, 郭玉玲, 李景潼. 扩散时间对纯镁锌钇共渗层组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(4): 178-182.
- YU Bin, GUO Yu-ling, LI Jing-tong. Effects of diffusion time on microstructure and properties of zinc-yttrium coating on pure magnesium[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2014, 35(4): 178-182.
- [20] 张远芬. 镁及镁合金表面固态扩渗合金化的机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
- ZHANG Yuan-fen. Studies on the mechanism of solid-state diffusion-alloying on the surface of magnesium and its alloy[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.
- [21] 刘鹏飞. 工艺参数的变化对纯镁固态扩渗表面合金层组织和性能的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- LIU Peng-fei. The effect of technical parameters on microstructure and properties of alloyed layer of pure magnesium by solid diffusion treatment[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004.
- [22] 马幼平, 刘玉高, 华建设. 扩渗时间对纯镁渗锌表面合金化的影响[J]. 热加工工艺, 2006, 35(1): 10-12.
- MA You-ping, LIU Yu-gao, HUA Jian-she. Effect of diffusion time on surface Zn-alloying for pure magnesium[J]. Hot working technology, 2006, 35(1): 10-12.
- [23] MA You-ping, LI Xiu-lan, YANG Lei. Effect of surface diffusion alloying on erosion wear property of ZM5 magnesium alloy[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2013, 23(2): 323-328.
- [24] 李琼, 郝兴安, 李勇. 计算机在材料科学中的应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2007.
- LI Qiong, HAO Xing-an, LI Yong. Application of Computer in Material Science[M]. Chengdu: Eindhoven University of Technology Press, 2007.
- [25] 曾晓雁, 吴懿平. 表面工程学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- ZENG Xiao-yang, WU Yi-ping. Surface engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [26] 马壮, 李和万, 李智超. 锌粉对 AZ31B 低温固相反应型 SiO₂ 基陶瓷涂层性能的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(24): 144-147.
- MA Zhuang, LI He-wang, LI Zhi-chao. Effects of zinc powder on property of SiO₂ based ceramic coating overlaying AZ31B by low temperature solid-phase reaction[J]. Hot working technology, 2010, 39(24): 144-147.
- [27] WEI L Y, DUNLOP G L, WESTENG H. The intergranular microstructure of cast Mg-Zn and Mg-Zn-rare earth alloys[J]. Metallurgical & materials transactions A, 1995, 26(8): 1947-1955.
- [28] NAYEB-HASHEMI A A, CLARK J B. Phase diagrams of binary magnesium alloys[M]. London: Workshops on Abstract State Machines, 1988.
- [29] 吴承建, 陈国良, 强文江. 金属材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- WU Cheng-jian, CHEN Guo-liang, QIANG Wen-jiang. Metal material science[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.