

铸造 1060 / AZ31 包铝镁合金界面结构与显微组织

李坊平¹⁾ 于文斌¹⁾ ✉ 蒋显全¹⁾ 杨青山²⁾

1) 西南大学材料科学与工程学院, 重庆 400715 2) 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400030

✉通信作者, E-mail: ywb@swu.edu.cn

摘要 为探索和改善轧制包铝镁合金板的界面结合状况, 用气体保护铸造法制备了 1060 铝板包覆 AZ31 镁合金铸锭. 借助金相显微镜、扫描电镜以及 X 射线衍射等分析方法, 研究了复合铸锭芯材及界面的显微组织和相结构, 并进行了硬度测试. 发现 AZ31 镁合金芯材组织由 α -Mg 基体以及沿晶界分布的不连续网状 α -Mg + β -Mg₁₇Al₁₂ 共晶体组成, 是一种典型的铸造离异共晶组织. 铸造包铝镁合金锭界面形成扩散溶解层, 扩散溶解层由 α -Mg 固溶体层、共晶层 (α -Mg + β -Mg₁₇Al₁₂)、 β -Mg₁₇Al₁₂ 及 AlMg 化合物层组成, 形成具有多层结构的冶金结合界面. 提出了浇注 AZ31 熔体的瞬间在 1060 铝板表面形成“熔池”并快速凝固的界面形成机制.

关键词 镁合金; 铝合金; 铸锭; 铸造; 金属复合; 扩散; 显微组织

分类号 TG 335.8

Microstructure and interfacial configuration of AZ31 magnesium alloy ingots clad by 1060 aluminium

LI Fang-ping¹⁾, YU Wen-bin¹⁾ ✉, JIANG Xian-quan¹⁾, YANG Qing-shan²⁾

1) School of Materials Science and Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China

2) School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China

✉ Corresponding author, E-mail: ywb@swu.edu.cn

ABSTRACT 1060 aluminium cladding AZ31 magnesium alloy composite ingots were prepared under gas protection to investigate and improve the interfacial combination. The microstructure, phase constituents and microhardness of the matrix and the interface were studied by use of optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). It is found that the microstructure of the as-cast AZ31 magnesium alloy consists mainly of the α -Mg matrix and the typical divorced eutectic of α -Mg and β -Mg₁₇Al₁₂ phases distributed along grain boundaries. A diffusion fusion layer forms in the interface, leading to a complex metallurgical interface with a multilayer of the α -Mg solid solution zone, the eutectic (α -Mg + β -Mg₁₇Al₁₂) zone and the Mg-Al intermetallic compound zone. The Mg-Al intermetallic compounds are made up of β -Mg₁₇Al₁₂ and AlMg. It is proposed that the formation mechanism of the complex interface layer is due to the emergence of a molten bath on the 1060 Al plate surface at AZ31 melt pouring moment and the rapid solidification subsequently.

KEY WORDS magnesium alloys; aluminum alloys; ingots; casting; metal cladding; diffusion; microstructure

镁合金是目前最轻的金属结构材料, 具有高的比强度和比刚度、电磁屏蔽性好和减震性好等特点, 在航空航天、汽车和 3C 产品中具有广泛的应用前景^[1-3]. 然而, 由于镁的化学活泼性很高, 并且形成的氧化膜疏松多孔, 对基体没有足够的保护能力, 不适用于大多数腐蚀性环境, 镁合金的腐蚀已成为限

制镁合金应用的关键因素之一; 此外, 镁合金的加工变形能力差也限制了变形镁合金的发展^[4-7]. 镁合金轧制板材具有广阔的开发应用潜力, 为解决腐蚀和加工问题, 采用耐蚀和加工性能良好的铝合金包覆在镁合金表面进行轧制, 获得的包铝镁板层状复合材料既具有良好的耐腐蚀能力, 又可大大改善镁

合金的加工成型性能,为此许多研究者进行了大量的尝试. Liu 等^[8-10]应用真空扩散连接工艺制备了 Mg/Al 层状复合板材,研究了界面附近的相组成, Zhao 等^[11]研究了 Zn 中间层对扩散连接 AZ31B / Al6061 复合板的剪切强度及界面相组成的影响;刘华赛等^[12]应用累积叠轧工艺制备了 Al/AZ31 多层复合材料. 但是,这些 Mg/Al 层状复合材料主要是依靠轧制、爆炸复合和扩散连接等工艺制备的,尚存在界面结合强度低、成材率低和工艺参数控制困难等问题.

应用铸造复合法制备锭坯,然后再进行热轧制备层状复合板材,复合板结合强度大,成材率高,因此受到广泛的关注,而采用铸造复合法制备 Al/Mg 复合板带的研究却还少见报道. 为此,本工作进行了以 1060 纯铝板为包覆金属,以 AZ31 镁合金为基体合金,用熔铸法制备 1060 Al 包覆 AZ31 镁合金复合锭坯的实验研究,为后续热轧加工提供质量良好的复合铸锭. 本文主要报道 1060 包覆 AZ31 合金复合锭坯的铸造方法及 1060/AZ31 复合界面的结合结构与显微组织,并对界面的形成过程和结合机理进行了分析与探讨.

1 实验材料及方法

实验用的芯材合金为商用 AZ31 镁合金锭,其化学成分如表 1 所示. 包覆层金属采用厚度为 1.6 mm 的 1060 纯铝板,其化学成分如表 2 所示. 实验过程为将重熔的 AZ31 镁合金浇注到预制的铝板盒中制备成 1060 铝包覆 AZ31 合金的复合锭坯.

预制的铝板盒采用氩弧焊加工,制成尺寸为 300 mm × 150 mm × 20 mm 且一侧开口的铝盒(如图 1 所示). 依次使用 5% 氢氧化钠溶液、5% 盐酸溶液和无水乙醇清洗铝盒型腔,以去除表面油污及氧化物. 浇注前将其装卡入专用的金属模具进行 200 °C 预热. 该模具可保证预制铝盒的底面及四周侧面与模具紧密贴合,提高复合铸锭的冷却速度(如图 2 所示).

表 1 AZ31 镁合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of AZ31 magnesium alloy %

Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Ni	Mg
3.06	1.18	0.47	0.016	≤0.002	≤0.002	≤0.0001	余量

表 2 1060 铝板的化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of 1060 aluminum plates %

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
0.21	0.09	0.01	0.01	0.01	0.02	0.017	余量

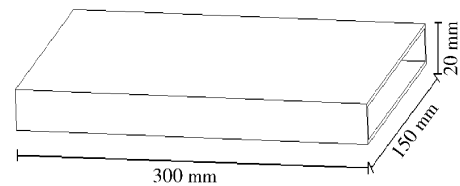


图 1 铝盒结构图

Fig. 1 Structure of the aluminum box

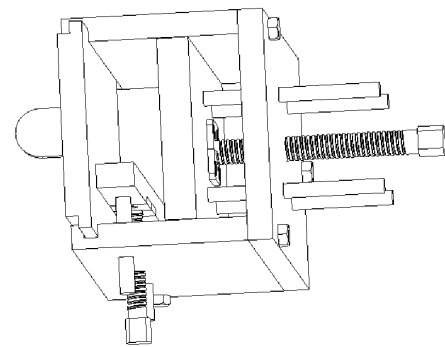


图 2 模具结构图

Fig. 2 Structure of the mould

采用井式电阻加热炉,不锈钢坩埚熔炼 AZ31 镁合金. 将计量好的 AZ31 合金加热至 720 °C 熔化后搅拌 5 ~ 8 min,静置保温 30 min 后出炉并除渣. 待温度冷却至 680 °C 时,将熔融的镁合金液浇注到铝盒中. 整个熔炼和浇注过程中用 CO₂ + 0.2% SF₆ 混合气体进行保护.

用线切割法从浇注的复合铸锭中高线位置截取金相试样,并用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀. 在 ZEISS 200 MAT 金相显微镜下进行金相观察;用 MHV2000 型显微硬度计进行基体和界面显微硬度 HV_{0.01} 的测试;用 DX-2000 型 X 射线衍射仪(Cu K_α)进行基体和界面的物相分析;用 TESCAN-VEGA 型扫描电子显微镜和 OXFORD-INCA 能谱仪对界面结构和化合物进行观察及分析.

2 实验结果与分析

2.1 AZ31 镁合金芯材的物相及显微组织

AZ31 铸造合金的 X 射线衍射(XRD)图谱如图 3 所示. 图中 2θ 值为 37.10°、32.88°和 35.04°的衍射峰可标定为 α-Mg 相(六方晶系,空间群 P63/mmc),与标准卡片的各衍射峰的位置相比,AZ31 铸造合金中 α-Mg 相的各个衍射峰均向高角度方向偏移约 0.5°. 由于镁合金结晶的体收缩率较高,熔融的镁合金液注入 1060 铝盒型腔中因模具的激冷作用,合金由表层向心部凝固,待合金完全凝固冷却至室温过程中因 Mg/Al 界面的结合,阻碍了合金的收

缩,导致室温下整个铸造 AZ31 合金基体产生宏观内应力,表现为衍射峰的偏移^[13].此外,在 2θ 为 36.20° 、 40.22° 和 43.92° 位置出现的衍射峰可以标定为 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相,但由于其含量较低,所以其衍射峰不够明显.这说明铸造 AZ31 镁合金芯材主要由 $\alpha\text{-Mg}$ 和少量的 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 两相组成.

图 4 为 AZ31 铸造合金的金相组织.由图中可以看出,铸造 AZ31 镁合金芯材由粗大的树枝状 $\alpha\text{-Mg}$ 晶粒及晶界上分布的不连续网状 $\alpha\text{-Mg} + \beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 共晶组织构成.

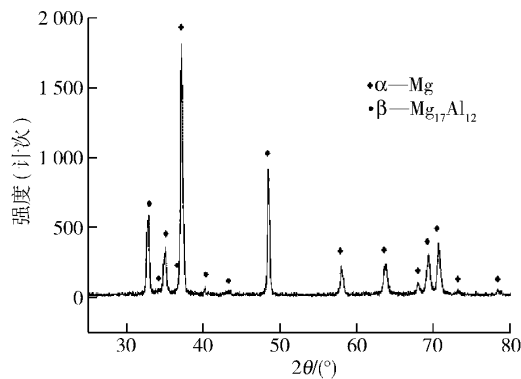


图 3 铸态 AZ31 合金 X 射线衍射图谱
Fig. 3 XRD spectrum of the as-cast AZ31 alloy

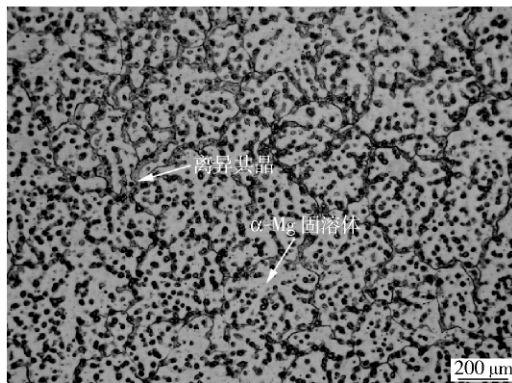


图 4 铸态 AZ31 合金显微组织
Fig. 4 Microstructure of the as-cast AZ31 alloy

2.2 1060/AZ31 包铝镁锭的界面结构

2.2.1 AZ31 镁合金界面显微组织及结构

图 5 为包铝镁锭在 AZ31 合金界面处的显微组织.可以看出,此处的界面由 $\alpha\text{-Mg}$ 固溶体层、共晶层和金属间化合物层组成. $\alpha\text{-Mg}$ 固溶体层依附于 AZ31 基体,厚度约为 $5\ \mu\text{m}$; 其后的共晶层厚度约 $80\sim 100\ \mu\text{m}$,为黑白相间的片层状组织;随后为金属间化合物层,有部分呈柱状的化合物枝晶伸入到共晶层中.

为进一步分析 AZ31 合金界面附近的组织形貌及相结构,对界面进行了扫描电镜 (SEM) 观察和能

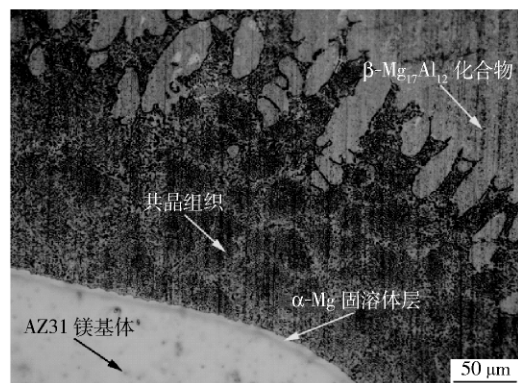


图 5 AZ31 合金界面显微组织
Fig. 5 Interfacial microstructure near AZ31 alloy

谱分析,如图 6 所示.图中左侧黑白相间的片层状组织为共晶层,右侧为化合物层.对共晶层和金属间化合物层的微区能谱 (EDS) 分析结果见表 3.图 6 中 A 区所示黑色相中 Mg 的摩尔分数为 100%,可判定为共晶层中的 $\alpha\text{-Mg}$ 相; B 区所示白色相 Mg 与 Al 的摩尔比为 58.8:41.2,与 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相中 Mg 和 Al 的摩尔比相同,由此确定白色层状相为 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相;而 C 区金属间化合物层中 Mg 与 Al 的摩尔比为 57.6:42.4,接近 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相中 Mg 与 Al 的摩尔比,考虑到能谱的测试误差,可以确定该金属间化合物层为 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相.

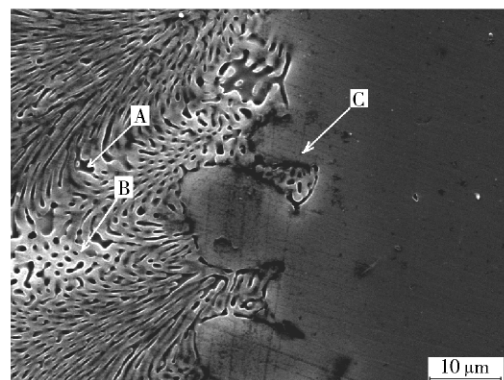


图 6 共晶层与金属间化合物层界面扫描电镜照片
Fig. 6 SEM image of the interface between the eutectic and intermetallic zones

表 3 共晶层和金属间化合物层的微区能谱分析结果(摩尔分数)
Table 3 EDS elemental results of the interface between eutectic and intermetallics zones

位置	Mg	Al
A	100	0
B	58.8	41.2
C	57.6	42.4

结合金相组织与能谱分析结果可知,复合铸锭

界面在 AZ31 合金附近的结构依次由 α -Mg 固溶体层、片层状 α -Mg + β -Mg₁₇Al₁₂ 共晶层和 β -Mg₁₇Al₁₂ 化合物层组成.

2.2.2 1060 纯铝界面显微组织及结构

包铝镁锭在 1060 铝板界面处的显微组织如图 7 所示. 图中呈灰色且较为平直的界面为 1060 纯铝板初始表面, 而呈白亮色波纹状区域为 Mg 元素在 1060 纯铝板的扩散层. 对扩散层进行 X 射线衍射分析, 主要为 AlMg 相, 如图 8 所示. 图 9 为对扩散层附近区域进行的 Mg 和 Al 元素的线扫描. 可以看出, 1060 纯铝板基体中 Mg 元素的含量接近于零, 扩散层中 Mg 和 Al 元素的摩尔分数基本相同, 说明扩散层为稳定的 AlMg 相.

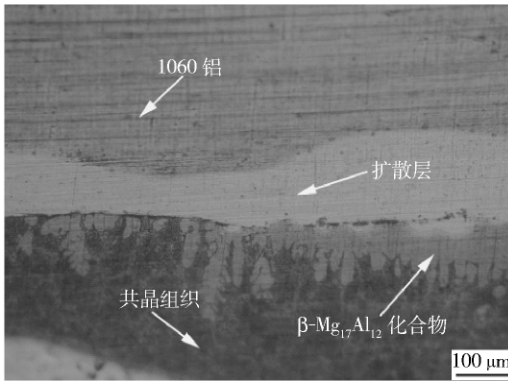


图 7 1060 纯铝界面附近显微组织

Fig.7 Interfacial microstructure near the 1060 aluminum plate

2.3 硬度测试

对铸造包铝镁锭界面附近进行了显微硬度测试, 如图 10(a) 所示. 从图 10(b) 的测试结果可以看出, AZ31 合金基体显微硬度的平均值为 HV 54.2, 而在共晶层位置由于硬质相 β -Mg₁₇Al₁₂ 含量的增加, 显微硬度值逐渐增大, 并在 β -Mg₁₇Al₁₂ 金属间化合物层和 AlMg 相扩散层达到硬度峰值, 其显微硬度值约 HV 230 左右, 至 1060 铝基体显微硬度急剧下降, 约为 HV 24.7. 包铝镁锭复合界面的显微硬

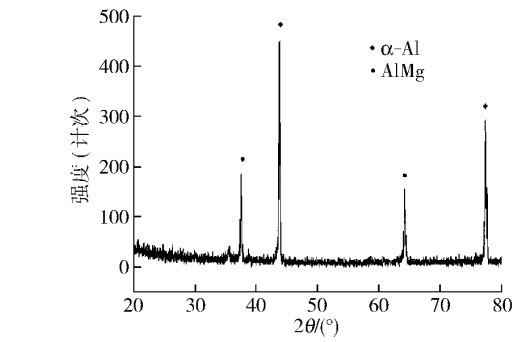
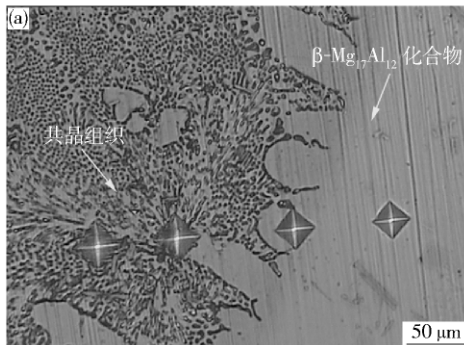


图 8 1060 纯铝界面附近 X 射线衍射谱

Fig.8 XRD pattern of the interfacial layer near 1060 aluminum

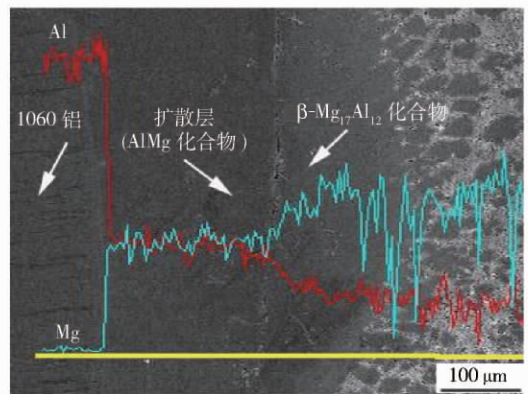


图 9 1060 铝板界面附近 Mg 和 Al 元素线扫描图

Fig.9 Line-scanning spectra of Al and Mg in the interfacial layer near 1060 aluminum

度变化与其组织结构相一致.

3 讨论

李世春等^[14]认为,任意两个不同的组元 A 和 B, 通过扩散热处理后都可以形成扩散溶解层. 假定在室温条件下将组元 A 和组元 B 接触在一起形成的相界面, 组成初始态(h 态); 将处于 h 态的组元 A 和 B 置于高温条件下保温足够长时间, 在相界面将形成扩散溶解层, 称为终态(t 态). 通过扩散溶解, 系统从 h 态过渡到 t 态, 整个过程就是扩散溶解过

图 10 铸锭复合界面硬度测试结果. (a) 压痕显微照片; (b) 扩散溶解层硬度曲线

Fig.10 Microhardness test of interfacial layers: (a) micrograph; (b) hardness curve of the diffusion fusion layer

程,对应于组元 A 和组元 B 扩散溶解层的形成. 扩散溶解层是具有普遍意义的物理现象,形成扩散溶解层的驱动力是两组元间的化学势差.

实验结果表明,本实验用熔融镁合金液浇注于预制铝盒制备的包铝镁锭,具有多重复杂的复合界面结构. 图 11 为复合铸锭界面结构示意图,描绘了 AZ31 合金在 1060 铝板盒内的凝固初始和凝固终止的界面结构变化,其原因是 Mg 原子与 Al 原子在高温进行多种形式互扩散的结果. AZ31 芯材镁合金的浇注温度为 680 °C,高于 1060 铝板的熔点,熔融镁液与铝板接触时,将使铝板在一定深度区域发生瞬间熔化,在界面附近形成富 Mg 和富 Al 两种元素

的“熔池”,具有巨大的互扩散浓度差. 由于模具强烈的散热作用,迫使微区“熔池”迅速凝固, Mg、Al 元素的液相扩散无法充分完成,因此在界面附近形成了较大的 Mg、Al 元素的浓度梯度,如图 12 所示,并在凝固和冷却过程中通过固相扩散进行溶质再分配. 图 7 所示的界面显微组织中出现较厚的 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 化合物层并朝向镁合金熔体呈树枝状生长,说明在凝固开始的瞬间有足够的 Al 原子,这只有当界面存在熔化的 1060 纯铝时才能通过短暂的液态扩散实现. 此外,在部分浇注的包铝镁锭中发现因铝盒与模具接触不严而局部熔穿的现象,也可证实 1060 铝板界面有“熔池”的存在.

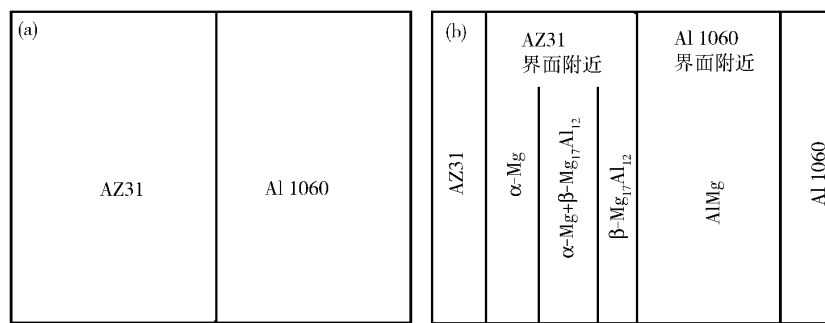


图 11 复合铸锭界面结构示意图. (a) 初始态; (b) 终态

Fig. 11 Schematic diagram of the interfacial layer of the ingot: (a) initial state; (b) final state

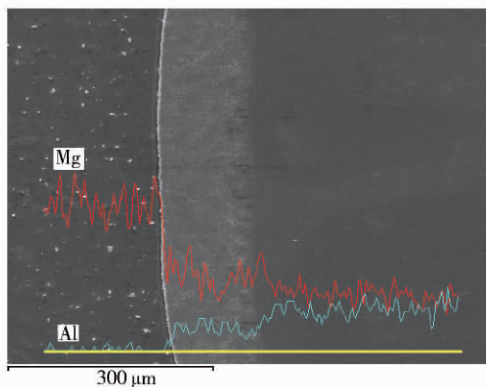


图 12 AZ31 镁合金界面处组织扫描图及 Mg、Al 元素线扫描曲线
Fig. 12 SEM image and line-scanning pattern of Mg and Al elements near AZ31 magnesium alloy

当 AZ31 合金浇注到预制铝盒后,由于金属模具强烈的散热作用,形成了由铸锭中心向边缘较大的温度梯度,因此凝固过程由边缘向中心逐渐进行,并形成复杂的复合界面结构. 首先是界面附近微“熔池”的凝固,因 Mg 原子的液态扩散和急冷作用,在与富 Al 原子的 1060 铝板接触界面先发生凝固,形成含铝量较高的 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 化合物层,并因成分过冷其凝固前沿呈树枝状生长. 随着凝固过程的进行,凝固前沿逐渐远离“熔池”接触界面,“熔池”中

铝元素含量逐渐降低,此时“熔池”中液相成分接近共晶成分点并发生共晶转变 $L \rightarrow \alpha\text{-Mg} + \beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$,形成片层状的 $\alpha\text{-Mg} + \beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 共晶组织. 当扩散来的 Al 原子消化殆尽后,后续的凝固组织即为原始的 AZ31 合金组织. 在共晶组织和 AZ31 合金原始组织的结合处,由于发生离异共晶的作用, AZ31 镁合金界面处贫 Al 而形成很薄的 $\alpha\text{-Mg}$ 固溶体层. 整个“熔池”微区的成分变化和组织演变过程与 Mg-Al 二元合金平衡相图的富镁侧部分一致,如图 13 所示. 说明 AZ31 基体界面附近扩散溶解层形成是微区“熔池”重结晶的过程. 然而在 1060 铝板附近界面,由于没有形成微区“熔池”效应,而是通过 Al、Mg 元素的固态互扩散,形成稳定的 AlMg 化合物扩散层,说明 1060 铝板界面附近扩散溶解层的形成是扩散型固态相变的过程.

由此可见,包铝镁锭复合界面的形成主要是镁与铝的界面反应和相互扩散的结果,复合界面的冶金结合是通过接触面上金属的熔化和扩散过程实现的,并在凝固过程中形成了复杂的界面结构. 界面的这种冶金结合无疑较机械压制及退火扩散结合的效果好,虽然产生了一定数量脆硬的金属间化合物相,不利于轧制加工,但却有利于轧制后双金属界面

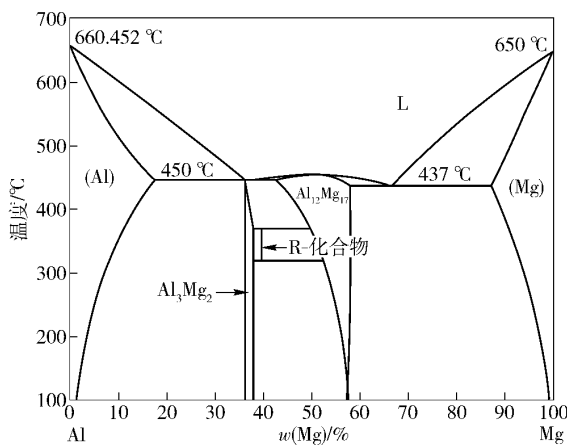
图 13 Mg-Al 二元合金平衡相图^[15]

Fig. 13 Equilibrium phase diagram of Mg-Al binary alloys

的结合^[16], 并且镁合金的轧制都是在较高温度的热轧, 可在一定程度上消除界面化合物的危害. 后续工作将对铸造包铝镁合金的轧制加工进行实验研究.

4 结论

(1) 利用气体保护熔铸法可以制备出有良好冶金结合界面的 1060 铝板包覆 AZ31 镁合金轧制锭坯. 锭坯的芯材组织由 α -Mg 基体及沿晶界分布的离异共晶组织构成.

(2) 铸造包铝镁合金锭界面形成扩散溶解层, 扩散溶解层由 α -Mg 固溶体层、共晶层 (α -Mg + β -Mg₁₇Al₁₂)、 β -Mg₁₇Al₁₂ 及 AlMg 化合物层组成, 形成了具有多层结构的冶金结合界面.

(3) 铸造复合界面的形成机制为: 在浇注瞬间 1060 铝板接触面形成“熔池”, 与 AZ31 镁合金进行短暂不充分的液相原子互扩散, 并在模具的急冷作用下快速凝固.

参 考 文 献

- [1] Wu G H, Sun M, Wang W, et al. New research development on purification technology of magnesium alloys. *Chin J Nonferrous Met*, 2010, 20(6): 1021
(吴国华, 孙明, 王伟, 等. 镁合金净化研究新进展. 中国有色金属学报 2010 20(6): 1021)
- [2] Weng H R, Ren Y L, Liu Y Q, et al. Super-high strength as-cast magnesium alloy. *Spec Cast Nonferrous Alloys* 2008 28(1): 71
(翁慧茹, 任英磊, 刘云秋, 等. 超高强度铸造镁合金的研究. 特种铸造及有色合金 2008 28(1): 71)
- [3] Zhang Y H, Gao D M, Hua Q, et al. Application of cast magnesium alloys and advances in research. *Foundry Technol* 2005 26(5): 423
(张宇辉, 高德民, 华勤, 等. 铸造镁合金的应用与研究进展. 铸造技术 2005 26(5): 423)
- [4] Song G L. Recent progress in corrosion and protection of magnesium alloys. *Adv Eng Mater*, 2005, 7(7): 563
- [5] Zeng R C, Lan Z D. Influence of bath temperature of conversion treatment process on corrosion resistance of zinc calcium phosphate conversion film on AZ31 magnesium alloy. *Chin J Nonferrous Met*, 2010, 20(8): 1461
(曾荣昌, 兰自栋. 镀液温度对 AZ31 镁合金表面锌钙系磷酸盐转化膜耐蚀性的影响. 中国有色金属学报 2010 20(8): 1461)
- [6] Zhang J, Yang D H, Wang D Y, et al. Mechanical properties of aluminum films on magnesium alloys by magnetron sputtering. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2008, 30(12): 1388
(张津, 杨栋华, 王东亚, 等. 镁合金表面磁控溅射沉积铝膜的力学性能. 北京科技大学学报 2008 30(12): 1388)
- [7] Cheng Y L, Chen Z H, Wang H M, et al. Progress in the research of corrosion and protection of magnesium alloys. *Mater Mech Eng*, 2005, 29(5): 1
(呈英亮, 陈振华, 王慧敏, 等. 镁合金的腐蚀与防护研究进展. 机械工程材料 2005 29(5): 1)
- [8] Liu P, Li Y J, Geng H R. A study of phase constitution near the interface of Mg/Al vacuum diffusion bonding. *Mater Lett*, 2005, 59(16): 2001
- [9] Wang J, Li Y J, Liu P. Microstructure and XRD analysis in the interface zone of Mg/Al diffusion bonding. *J Mater Process Technol*, 2008, 205(1-3): 146
- [10] Li Y J, Liu P, Wang J, et al. XRD and SEM analysis near the diffusion bonding interface of Mg/Al dissimilar materials. *Vacuum*, 2007, 82(1): 15
- [11] Zhao L M, Zhang Z D. Effect of Zn alloy interlayer on interface microstructure and strength of diffusion-bonded Mg-Al joints. *Scripta Mater*, 2008, 58(4): 283
- [12] Liu H S, Zhang B, Zhang G P. Al/AZ31 multilayered composite prepared by accumulative rolling bonding technique and its strength. *Chin J Rare Met*, 2009, 33(2): 285
(刘华赛, 张滨, 张广平. 累积叠轧焊制备 Al/AZ31 多层复合材料及其强度. 稀有金属 2009 33(2): 285)
- [13] Yang Y X, Qi R. *X-ray Diffraction Analysis*. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1989
(杨于兴, 漆睿. 射线衍射分析. 上海: 上海交通大学出版社, 1989)
- [14] Li S C. *Diffusion Fusion Layer in Phase Boundary: Superplastic of Zn-Al Eutectic Alloys*. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006
(李世春. 相界扩散溶解层: Zn-Al 共晶合金的超塑性. 东营: 中国石油大学出版社, 2006)
- [15] Xu H, Liu J A, Xie S S. *Magnesium Alloy Fabrication and Processing Technology*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007
(徐河, 刘静安, 谢水生. 镁合金制备与加工技术. 北京: 冶金工业出版社, 2007)
- [16] Zhang Y B, Wang Q J. Study on the mechanism of rolling-bonding of aluminum cladding magnesium alloy. *Dev Appl Mater*, 2009, 24(6): 72
(张毅斌, 王群骄. 包铝镁板轧制复合机理的研究. 材料开发与应用 2009 24(6): 72)