

# Pb-Sn 对压铸 AZ81 镁合金组织和力学性能的影响

马小黎<sup>1,3</sup>, 游国强<sup>1,2</sup>, 郭伟<sup>1</sup>

(1. 重庆大学, 重庆 400044)

(2. 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400030)

(3. 重庆市大明汽车电器有限公司, 重庆 401122)

**摘要:** 向 AZ81 镁合金中分别加入 0.5%Pb、0.5%Pb+0.5%Sn、0.5%Pb+1.0%Sn 合金元素并压铸成型, 研究了各成分合金的微观组织和室温、180 °C 力学性能。结果表明: AZ81-0.5Pb-1.0Sn 中存在多边形 Mg<sub>2</sub>Sn, 主要分布在晶界; 同时, Pb 和 Sn 元素的加入在一定程度上减少了晶界上 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 的数量, 有助于提高镁合金的耐中高温性能; 室温下, 压铸 AZ81-0.5Pb-(0, 0.5, 1.0)Sn 合金抗拉强度和屈服强度随着 Sn 含量的增加而提高, 压铸 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 的抗拉强度为 211 MPa、屈服强度为 150.5 MPa; 180 °C 下, 随着 Sn 含量的增加, 抗拉强度和屈服强度均提高, 压铸 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 抗拉强度值为 200.5 MPa、屈服强度为 145.2 MPa; 添加元素 Pb+Sn 使压铸 AZ81 的 180 °C 断裂机制由塑性断裂向脆性断裂转变。

**关键词:** 镁合金; 压铸; Pb; Sn; 中高温力学性能

**中图分类号:** TG146.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2018)08-2525-06

镁合金具有比强度高、阻尼减振和导热导电性好、铸造成型及机加工工艺性好、易回收等特点, 在地面交通工具、航空航天等领域具有良好的应用前景<sup>[1-3]</sup>。Mg-Al 系 (AZ 和 AM 系列) 铸造镁合金在工程界应用较为普遍, 其生产方式以铸件为主, 但 Mg-Al 系合金中主要的第二相 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 在高于 100 °C 的中高温环境下易软化使合金力学性能迅速衰减, 限制了其应用。

目前, 提高镁合金在室温及中高温环境下的性能是学术界的一个重要课题。其中, 加入 Sn 元素是近年来提高镁合金中高温性能的一个新途径。研究表明, Sn 元素有改善镁合金中高温性能的作用, 但一般需要进行固溶+时效热处理, 以获得细小且弥散分布的 Mg<sub>2</sub>Sn (熔点 778 °C) 析出相, 同时能在一定程度上减少晶界处易软化 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相析出的作用, 可提高镁合金的耐高温性能<sup>[4-10]</sup>。此外, 铸造 Mg-Al 系合金为了保证铸造工艺性能, 含铝量一般较高凝固态组织的晶界上往往存在对耐高温性能不利的低熔点 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相, 针对这一问题, 有研究向镁合金中加入一定量的 Pb, 并对铸态试样进行固溶+时效处理, 结果表明, Pb 具有抑制 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 在晶界有害析出、促进在晶内有益析出的作用<sup>[11-13]</sup>。总之, 现有研究显示, 向镁合金中单独加入 Sn 或者 Pb、并进行固溶+时效处理均能提高镁合金中高温性能, 但现有研究均针对的是变形态或者重力铸造镁合金, 鲜见将上述

方法应用于压铸镁合金的报道。因为众所周知, 压铸态镁合金由于含气量高, 不适合进行高温的固溶处理 (会产生铸件表面鼓泡等缺陷)。

在上述背景下, 本研究以压铸 AZ81 镁合金为基础, 同时加入 Pb 和 Sn, 以期生成 Mg<sub>2</sub>Sn, 并利用压铸的快速凝固特性抑制 Mg<sub>2</sub>Sn 在凝固过程中长大, 从而获得细小的 Mg<sub>2</sub>Sn 相一次相, 提高合金性能; 同时, 利用 Pb 抑制 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 在晶界有害析出、促进晶内有益析出的作用, 综合作用改善压铸 AZ81 的中高温性能, 并尽量不损失室温性能。

## 1 实验

设计成分为 AZ81-0.5Pb-(0, 0.5, 1.0)Sn, 以 AZ81 作为对比合金。实验时, 将 AZ81 镁合金在气体保护下熔化, 然后在 720 °C 分别加入含量为 0.5% 的 Pb 和不同质量的 Sn, 充分搅拌并保温 0.5 h 左右后, 在 700 °C 浇注并压铸成型 (采用力劲 DCC630 型卧式冷室压铸机), 压铸试样如图 1 所示。

本研究所涉及检测的试样均是从图 1 中 A 部分取样, 其尺寸如图 1 所示, 用 XRF (X 射线荧光光谱) 检测试样的化学成分, 用 OM (光学显微镜)、SEM (扫描电镜)、EDS (能谱仪) 和 XRD (X 射线衍射分析仪) 观察、分析试样微观组织, 用万能试验机检测试样室温

收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 重庆大学大型仪器设备开放基金 (201512150010); 四川省科技计划项目 (2013GZ0128)

作者简介: 马小黎, 女, 1989 年生, 硕士, 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044, E-mail: maxiaolilut@163.com

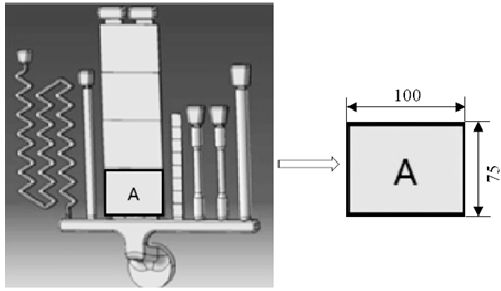


图 1 压铸试样三维图及部分尺寸

Fig.1 3D figure of die casting specimen and size of one part

(1) AZ81 中第二相呈连续网状；而含 Pb、Sn 元素的合金晶界处的第二相的连续性相对更弱，而且数量上也有一定的减少，这表明 Pb 和 Sn 可能具有抑制 Mg-Al

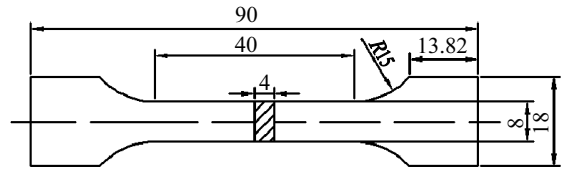


图 2 室温拉伸试样尺寸

Fig.2 Size of tensile specimens at ambient temperature

和 180 °C 力学性能，其中力学性能试样取自图 1 中 A 部分采用线切割并打磨分别加工成如图 2、图 3 所示尺寸，并用 SEM 观察其断口形貌。

## 2 结果及讨论

### 2.1 合金的化学成分

使用 XRF 测得合金的化学成分，结果如表 1 所示。Zn 和 Pb 元素的含量有一些波动，但各元素的含量波动均在可接受范围内。

### 2.2 微观组织

图 4 为各合金试样的光学显微组织。4 种合金的组织具有 2 个共同点：一是各合金均呈枝晶特征；二是组织均主要由  $\alpha$ -Mg 和位于晶界的  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 第二相组成。不同之处如下：

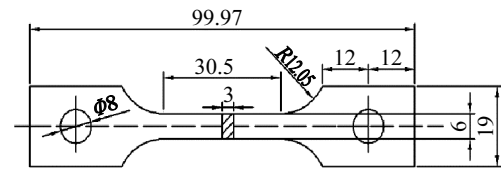


图 3 180 °C 拉伸试样尺寸

Fig.3 Size of tensile specimens at mid-temperature 180 °C

表 1 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of alloys (wt%)						
Alloy	Al	Zn	Pb	Sn	Mn	Mg
AZ81	8.28	1.52	-	-	0.24	Bal.
AZ81-0.5Pb	7.77	0.98	0.25	-	0.26	Bal.
AZ81-0.5Pb-0.5Sn	8.17	0.82	0.39	0.50	0.26	Bal.
AZ81-0.5Pb-1.0Sn	8.50	1.12	0.60	1.05	0.28	Bal.

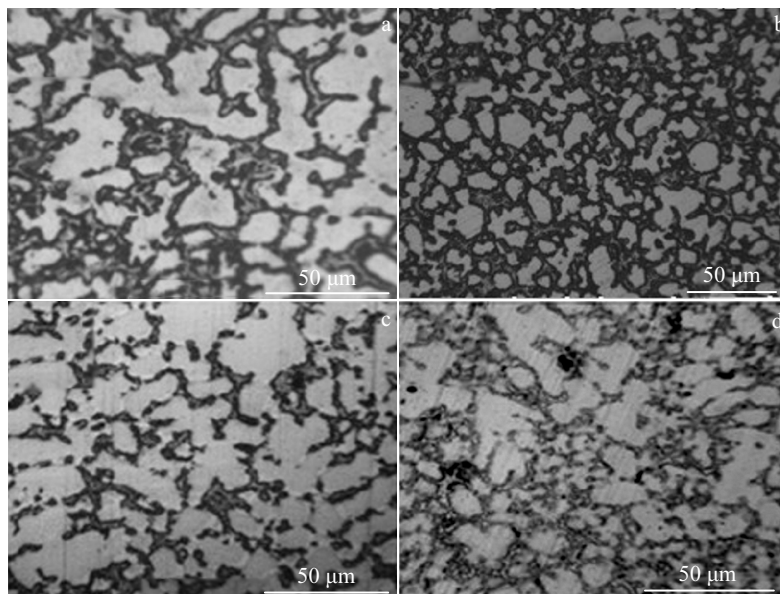


图 4 压铸态 AZ81-0.5Pb-xSn 镁合金的光学显微组织

Fig.4 Optical microstructures of die casting AZ81-0.5Pb-xSn alloys: (a) AZ81, (b) AZ81-0.5Pb, (c) AZ81-0.5Pb-0.5Sn, and (d) AZ81-0.5Pb-1.0Sn

合金中  $Mg_{17}Al_{12}$  相形成的作用, 但机理尚不完全明确, 有待于进一步研究。总之, 由于镁合金中第二相  $Mg_{17}Al_{12}$  熔点 (437 °C) 较低, 在中高温环境中容易软化使镁合金的性能不稳定, 这也是降低 Mg-Al 系镁合金在中高温环境下力学性能的主要原因, 因此向镁合金中加入少量 Pb 和 Sn 减少  $Mg_{17}Al_{12}$  相的形成可以提高镁合金在中高温下的稳定性。

(2) 图 5 的 SEM 照片表明, AZ81-0.5Pb-1.0Sn 的显微组织中有少量颗粒相出现, 这些颗粒呈多边形, 且主要分布在晶界, 与晶界处的  $Mg_{17}Al_{12}$  相交织在一起。图 6 所示的 EDS 结果显示, 这些不规则颗粒相均含有 Sn 原子 (不含 Pb), 推测应为  $Mg_2Sn$ 。图 7 为各合金的 XRD 分析结果, XRD 结果显示 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 中存在  $Mg_2Sn$  相, 由此可以推断这个试样组织中的颗粒相为  $Mg_2Sn$  相。此外, 从金相照片、SEM 和 EDS、XRD 结果上均未发现有含 Pb 相出现, 表明 Pb 应该主要以固溶形式存在, 这与已有研究结果相一致。

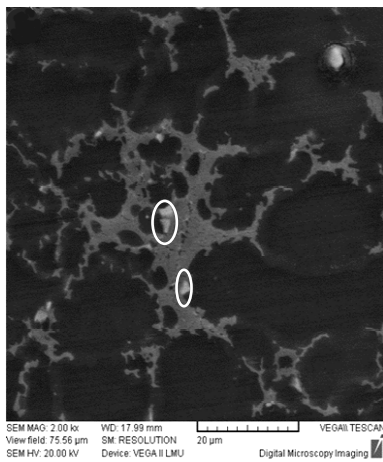


图 5 压铸 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 的 SEM 照片

Fig.5 SEM image of die casting AZ81-0.5Pb-1.0Sn alloys

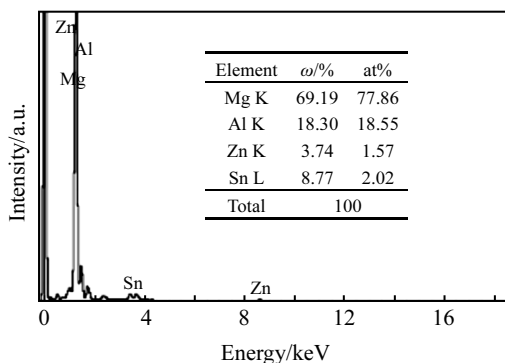


图 6 图 5 中圈中区域的 EDS 结果

Fig.6 EDS results of the circled area in Fig.5

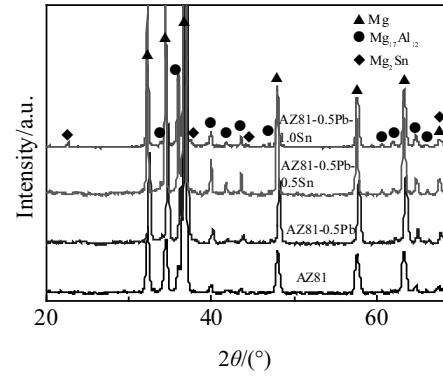


图 7 压铸 AZ81-0.5Pb-xSn 与 AZ81 合金的 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of die casting AZ81-0.5Pb-xSn and AZ81 alloys

### 2.3 力学性能

#### 2.3.1 室温力学性能

图 8 为压铸 AZ81 及压铸 AZ81-0.5Pb-(0, 0.5, 1.0)Sn 镁合金的室温力学性能结果, 从图中可以看出, 合金的室温抗拉强度、屈服强度随着 Sn 含量的增加呈现增加趋势, 而延伸率随着 Sn 含量的增加呈先降低后增加的趋势。

由图 8a 压铸 AZ81 0.5Pb-(0, 0.5, 1.0)Sn 各合金的室温抗拉强度结果可以看到, 随着 Sn 含量的增加, 合金室温抗拉强度逐渐升高, AZ81-0.5Pb-1.0Sn 抗拉强度最高, 为 211 MPa, 比压铸 AZ81 提高了 4.17%; AZ81-0.5Pb 和 AZ81-0.5Pb-0.5Sn 合金抗拉强度则均比压铸 AZ81 低, 原因应该是 0.5%Pb、0.5Pb+0.5%Sn 元素使合金中原强化相  $Mg_{17}Al_{12}$  减少, 而 Pb 和 Sn 的含量较低, Pb 的固溶强化效果和 Sn 形成  $Mg_2Sn$  的强化效果均较弱, 不能补偿  $Mg_{17}Al_{12}$  减少所带来的强度损失。

由图 8b 压铸 AZ81 0.5Pb-(0, 0.5, 1.0)Sn 各合金的室温屈服强度结果可以看到, 随着 Sn 含量的增加, 合金的屈服强度呈逐渐升高的趋势, AZ81-0.5Pb-1.0Sn 合金的屈服强度最高, 为 150.5 MPa, 比 AZ81 提高了 34.4%; AZ81 0.5Pb 和 AZ81-0.5Pb-0.5Sn 屈服强度则均比压铸 AZ81 低, 其规律及原因基本与抗拉强度一致 (如上文所述), 这里不再赘述。

由图 8c 压铸 AZ81 0.5Pb-(0, 0.5, 1.0)Sn 各合金的室温延伸率结果可以看到, 随着 Sn 含量的增加, 各合金的室温延伸率先降低后升高, 但均比压铸 AZ81 低; 其中 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 延伸率最高, 接近 AZ81 的水平。由图中可以看出, AZ81-0.5Pb 合金延伸率比 AZ81 低, 说明 Pb 元素有使压铸镁合金延伸率降低的作用, 而 Sn 元素有使镁合金的延伸率升高的作用<sup>[4]</sup>, 当 Pb 为 0.5%、Sn 为 0% 和 0.5% 时, 前者作用大于后者; 当 Sn 含量升

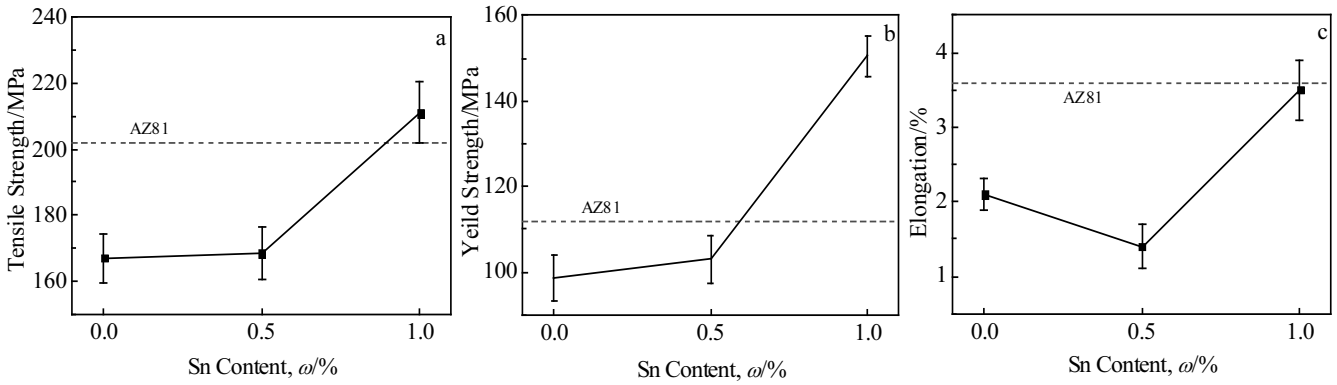


图 8 压铸 AZ81-0.5Pb-xSn 合金的室温力学性能

Fig.8 Mechanical properties of die casting AZ81-0.5Pb-xSn alloys at ambient temperature: (a) tensile strength, (b) yield strength, and (c) elongation

高到 1.0%，Sn 元素提高镁合金延伸率的作用增加，使镁合金延伸率提高，其确切的原因还需要更深入的研究。

综上所述，压铸 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 合金的室温抗拉强度和屈服强度较压铸 AZ81 合金有所改善，延伸率基本相当。

### 2.3.2 180 °C 力学性能

图 9 为压铸 AZ81 及压铸 AZ81-0.5Pb-(0, 0.5, 1.0)Sn 合金在 180 °C 下的力学性能结果，可以看出，随着 Sn 含量的增加，压铸 AZ81-0.5Pb-(0, 0.5, 1.0)Sn 各合金抗拉强度和屈服强度大体呈增加趋势，而延伸率随着 Sn 含量的增加呈先增加后降低的趋势。

由图 9a 压铸 AZ81 及压铸 AZ81-0.5Pb-(0, 0.5, 1.0)Sn 各合金的 180 °C 抗拉强度结果可以看到，随着 Sn 含量的增加，压铸 AZ81-0.5Pb-(0, 0.5, 1.0)Sn 各合金 180 °C 抗拉强度逐渐升高，而压铸 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 的抗拉强度明显升高且比 AZ81 抗拉强度高，为 200.5 MPa，比 AZ81 提高了 22.3%，比 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 室温抗拉强度仅衰减了 5.0%；另 2 种合金抗拉强度均比 AZ81 低，

原因应该是 AZ81-0.5Pb 中无高温强化相  $Mg_2Sn$ ，AZ81 0.5Pb-0.5Sn 中则也未形成  $Mg_2Sn$  或者含量太低（如图 7，AZ81-0.5Pb-0.5Sn 中  $Mg_2Sn$  的衍射峰不明显），而压铸 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 合金组织中形成了弥散分布在晶界的高温强化相  $Mg_2Sn$ （如图 7 所示），其熔点高，显微硬度高，在高温下，有效强化了晶界，阻碍了位错运动，提高了压铸 AZ81 镁合金在 180 °C 的抗拉强度。

由图 9b 压铸 AZ81 及各合金的 180 °C 屈服强度结果可以看到，其变化趋势与 180 °C 抗拉强度相同，其中压铸 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 最高，为 145.2 MPa，比压铸 AZ81 提高了 41.0%，比 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 的室温屈服强度衰减了 3.5%，其原因与上述关于 180 °C 抗拉强度的讨论相同。

由图 9c 各合金的 180 °C 延伸率结果可以看到，随着 Sn 含量的增加，压铸 AZ81-0.5Pb-(0, 0.5, 1.0)Sn 延伸率呈先升高后降低的趋势，且均比 AZ81 延伸率低。原因可能是，在室温下 AZ81 镁合金可开动的滑移系少，高温下压铸 AZ81 镁合金滑移系增加产生交滑移，塑性大

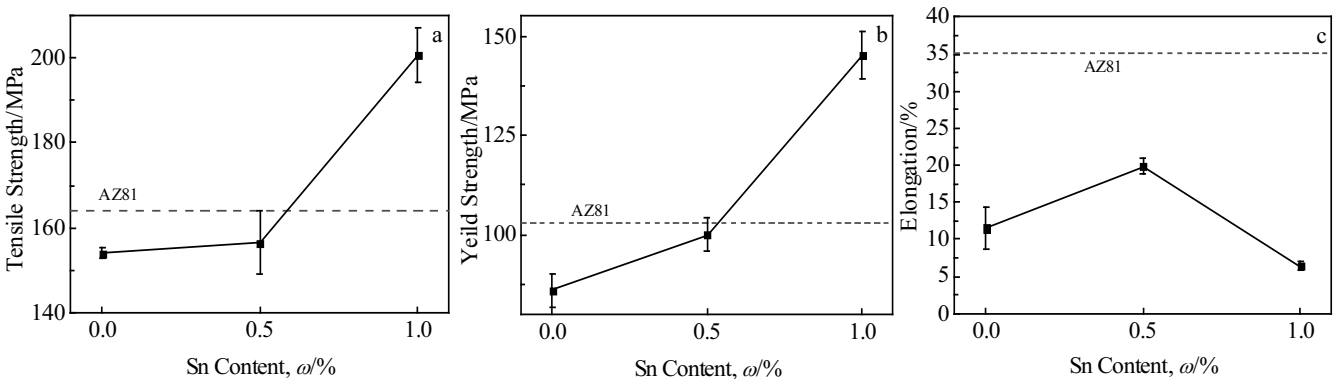


图 9 压铸 AZ81-0.5Pb-xSn 的 180 °C 力学性能

Fig.9 Mechanical properties of die casting AZ81-0.5Pb-xSn alloys at 180 °C: (a) tensile strength, (b) yield strength, and (c) elongation

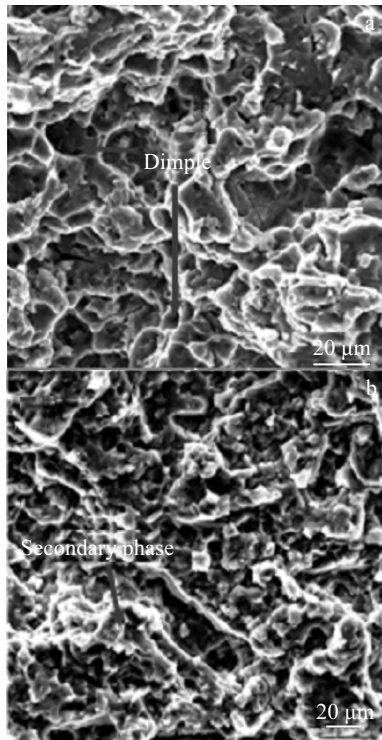


图 10 AZ81 和 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 180 °C 拉伸断口形貌 SEM 图

Fig.10 SEM images of tensile fractographs for die casting magnesium alloys tested at 180 °C: (a) AZ81 and (b) AZ81-0.5Pb-1.0Sn

大提高; 而含合金元素的压铸 AZ81-0.5Pb-(0, 0.5, 1.0)Sn 组织中的 Pb 元素使合金的延伸率降低, 耐高温相  $Mg_2Sn$  熔点高, 结构稳定, 虽然提高了合金的强度, 但在一定程度上牺牲了组织的塑性, 降低了合金的延伸率, 且 Sn 含量更高的合金, 延伸率更低。

综上所述, 180 °C 下, 随着 Sn 含量的增加, 压铸 AZ81 0.5Pb-(0, 0.5, 1.0)Sn 各合金的抗拉强度和屈服强度均呈增加趋势, 其中压铸 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 的抗拉强度最高, 比 AZ81 有明显提高, 但延伸率有所降低。

为研究添加元素对合金断裂机制的影响, 观察了压铸 AZ81、AZ81-0.5Pb-1.0Sn 的 180 °C 断口形貌 (如图 10 所示)。由图 10a 可以看到, 压铸 AZ81 合金断口有一些韧窝迹象, 而图 10b 压铸 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 几乎无韧窝, 有撕裂棱; 由图 10b 断口中能看到第二相颗粒。对比说明, 压铸 AZ81 合金 180 °C 拉伸断裂为塑性断裂, 压铸 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 合金为脆性断裂。

### 3 结 论

1) 压铸 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 镁合金中的 Sn 可与 Mg 形成多边形  $Mg_2Sn$  耐高温质点, 主要分布在晶界, 可有效钉扎晶界, 提高镁合金耐中高温性能; Sn 和 Pb 元素在一定程度上减少了晶界上第二相  $Mg_{17}Al_{12}$  数量和降低其连续性的作用, 有助于提高镁合金的耐中高温性能。

2) 压铸 AZ81-0.5Pb-(0, 0.5, 1.0)Sn 镁合金室温抗拉强度和屈服强度随着 Sn 含量的增加而增加, 其中压铸 AZ81 0.5Pb-1.0Sn 的抗拉强度为 211 MPa、屈服强度为 150.5 MPa, 分别比压铸 AZ81 提高了 4.17%、34.4%; 180 °C 下, 随着 Sn 含量的增加, 抗拉强度和屈服强度均增加, 压铸 AZ81-0.5Pb-1.0Sn 抗拉强度值为 200.5 MPa、屈服强度为 145.2 MPa, 分别比压铸 AZ81 提高了 22.3%、41.0%。

3) 添加元素 Pb+Sn 使压铸 AZ81 的 180 °C 断裂机制由塑性断裂向脆性断裂转变。

### 参考文献 References

- [1] Guo Yuqin(郭玉琴), Zhu Xinfeng(朱新峰), Yang Yan(杨艳) *et al.* *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2015, 40(3): 1
- [2] Zafari A, Ghasemi H M, Mahmudi R. *Materials & Design*[J], 2014, 54: 544
- [3] Kabirian F, Mahmudi R. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2009, 40(9): 2190
- [4] Zhang Dahua(张大华), You Fenshuang(游粉霜). *China Foundry Machinery & Technology*(中国铸造装备与技术)[J], 2009(6): 13
- [5] Chen Jun(陈君), Li Quanan(李全安), Li Xiaofeng(李肖丰) *et al.* *Foundry*(铸造)[J], 2009, 58(2): 151
- [6] Jung I C, Kim Y K, Cho T H *et al.* *Metals and Materials International*[J], 2014, 20(1): 99
- [7] Mahmudi R, Moeendarbari S. *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 566: 30
- [8] Sun Yangshan(孙扬善), Weng Kunzhong(翁坤忠), Yuan Guangyin(袁广银). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 1999, 9(1): 55
- [9] Li Ping(李萍). *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2009, 30(5): 1
- [10] Sevik H, Açıkgöz S, Kurnaz S C. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2010, 508(1): 110
- [11] Kashyap K T, Ramachandra C, Sujatha M *et al.* *Bulletin of Materials Science*[J], 2000, 23(1): 39
- [12] Srinivasan A, Pillai U T S, Pai B C. *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 452-453: 87
- [13] Balasubramani N, Srinivasan A, Pillai U T S *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 457(1-2): 275

## Effects of Pb-Sn on Microstructure and Mechanical Properties of Die Casting AZ81 Magnesium Alloy

Ma Xiaoli<sup>1,3</sup>, You Guoqiang<sup>1,2</sup>, Guo Wei<sup>1</sup>

(1. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(2. National Engineering Research Center for Magnesium Alloy Materials, Chongqing 400030, China)

(3. Chongqing Daming Automobile Electric Appliance Co. Ltd, Chongqing 401122, China)

**Abstract:** Effects of adding alloying elements (0.5%Pb, 0.5%Pb+0.5%Sn, 0.5%Pb+1.0%Sn) on the microstructure and mechanical properties of die casting AZ81 alloy at room temperature and 180 °C were investigated. Results show that in the alloy of AZ81-0.5Pb-1.0Sn, there is polygon  $Mg_2Sn$  phase at grain boundary. In the meantime, Pb and Sn suppress the formation of precipitation  $Mg_{17}Al_{12}$  at grain boundary to a certain extent, which contributes to the medium temperature resistance. At room temperature, the tensile strength and yield strength of the alloys increase with the increase of Sn content. The tensile strength and yield strength of die casting AZ81-0.5Pb-1.0Sn at room temperature are 211 MPa and 150.5 MPa, respectively. At 180 °C, the tensile strength and yield strength increase with the increase of Sn content as well. The tensile strength and yield strength of die casting AZ81-0.5Pb-1.0Sn alloy at 180 °C are 200.5 MPa and 145.2 MPa, respectively. Pb-Sn makes the fracture mechanism of AZ81 transfer from plasticity to brittleness.

**Key words:** magnesium alloy; die casting; Pb; Sn; medium and high temperature mechanical property

---

Corresponding author: You Guoqiang, Ph. D., Associate Professor, College of Materials of Science and Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China, Tel: 0086-23-65112626, E-mail: ygq@cqu.edu.cn