● 工艺技术 Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.05.008

微量 Mn 对 Al-7%Mg 合金铸锭组织和力学性能的影响

李盛锋,李继林,农 登,孙小燕,路建宁,刘明阳
(广东省材料与加工研究所,广东 广州 510651)

摘 要:采用光学显微镜(OM)、流动性及力学性能测试等分析手段研究了微量的 Mn 元素对 Al-7%Mg 合金铸态微观组织、流动性及力学性能的影响。结果表明,微量 Mn 的添加对 Al-7%Mg 合金的晶粒细化效果并不明显;但对改善合金力学性能是有益的,随着 Mn 含量的增加,Al-7%Mg 合金流动性先增加后降低,当添加 0.15%Mn 时,合金的单向流动性能最好,平均流动长度达到 900 mm;Mn 含量在 0.05%~0.25%内变动时,合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率均随着 Mn 的增加而显著提高,添加 0.25% Mn 时分别为 299 MPa、151 MPa 和 12.6%。

关键词:Mn 含量;Al-7%Mg 合金;流动性;力学性能;微观组织

中图分类号:TG.146.21; TG113 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)05-0461-04

Effect of Trace Mn on Microstructure and Mechanical Properties of Al-7%Mg Alloy Ingots

LI Shengfeng, LI Jilin, NONG Deng, SUN Xiaoyan, LU Jianning, LIU Mingyang
(Institute of Material and Forming Technology of Guangdong Province, Guangzhou 510651, China)

Abstract: The effects of trace Mn on the as-cast microstructure, fluidity and mechanical properties of Al-7%Mg alloy were investigated by means of optical microscopy (OM), fluidity and mechanical properties test. The results show that the addition of trace Mn has no obvious grain refining effect on Al-7%Mg alloy; but, it is beneficial to improve the mechanical properties of the alloy. With the increase of Mn content, the fluidity of Al-7%Mg alloy increases first and then decreases. When 0.15% Mn is added, the unidirectional popularity of the alloy is the best, and the average flow length reaches 900 mm. When the Mn content fluctuated within 0.05%~0.25%, the tensile strength, yield strength and elongation of the alloy increased significantly with the increase of Mn. When adding 0.25% Mn, they were 299 MPa, 151 MPa and 12.6% respectively.

Key words: Mn content; Al-7%Mg alloy; fluidity; mechanical properties; microstructure

铝合金在工业中的应用日趋广泛,这些合金通常都具有良好的流动性和力学性能。其中,Al-Mg 系合金是广泛应用的铸造铝合金之一,属于热处理不可强化铝合金,具有较高的力学性能、优异的耐蚀性能、良好的焊接性和可切削加工等优点,在交通运输、建筑建材、电器工业等工业领域有着极为广泛的应用[1,2]。

目前应用的 Al-Mg 系合金的合金化程度都比较高[3],Mg 含量的增加可有效提高 Al-Mg 合金的强韧性,但也使得合金的流动性、抗应力腐蚀性能以及塑性等变差。为进一步提高 Al-Mg 合金的性能,合金化是选用最多的方法,主要利用固溶强化和细晶强化机理提高合金的性能。

添加微量稀土元素 Sc 可以在 Al-Mg 合金凝固时形成弥散、共格的 Al_3Sc 相,产生细晶强化,进而改善铸态合金的显微组织和力学性能,但是 Sc 成本高,难以实现工业化[4,5];添加 Er 和 Yb 可在一定程度上抑制合金的再结晶,增加合金的屈服强度和断裂强度[6];添加 Y、Ce 可以起到净化合金熔体,减小柱状晶和细化合金的二次枝晶臂间距从而达到细化晶粒的作用,改善 Al-Mg 合金的铸造性能[7,8]。

目前的研究中,Mn 的添加量一般在 0.3%~0.8%,Mn 含量过高时,会形成粗大含 Mn 相,显著降低合金塑性[9],对微量 Mn 对 Al-Mg 合金的性能的影响研究尚不全面。本文以铸造 Al-7%Mg-xMn 合金为研究对象,通过调整 Mn 元素的含量,研究其对

收稿日期:2019-03-02
基金项目:广东省应用型科技研发专项(2016B090931004,2015B090926007);广东省产学研合作项目(2014B090903012);广东省产学研合作重大成果转化专题(2013B090200008)
作者简介:李盛锋(1968-),广西南丹人,工程师.主要从事铝合金熔铸方面的工作.电话 020-61086612,E-mail:13902307349@139.com

Al-7%Mg 合金显微组织、流动性和力学性能的影响规律。

1 试验材料与方法

研究用材料为采用铸锭冶金法熔炼制备的 Al-7%Mg-xMn 合金，其成分设计如表 1 所示，4 种合金仅仅是 Mn 含量不同。在试验过程中，首先将纯度为 99.7%的工业纯铝在电阻炉中用石墨粘土坩埚加热到 760 ℃熔融，然后依次加 99.9%的工业纯镁、Al-5Cr、Al-Ti-B 等中间合金，待合金完全熔化后将熔体温度降至 720 ℃加入精炼剂精炼，之后通入氩气进行除气、除渣，并在该温度下保温 10 min，最后将熔体浇入预热 200 ℃的模具中进行流动性测试。

表1 Al–7%Mg合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of Al–7% Mg alloy

No.	Mg	Mn	Cr	Ti	Al
1#	7.0	0.05	0.2	0.15	Bal.
2#	7.0	0.15	0.2	0.15	Bal.
3#	7.0	0.18	0.2	0.15	Bal.
4#	7.0	0.25	0.2	0.15	Bal.

Al-7%Mg-xMn 合金流动性测试采用水平直棒试样测试法[9]，铸型为钢制模具（见图 1），试验时将合金液浇入铸型中并测量合金液流动的长度，每种编号试验重复 3 次取其平均值。

试样经打磨、抛光、腐蚀后采用 Leica DM IL LED 型光学显微镜进行金相组织分析，采用 CSS-44100 万能电子测试机在室温条件下以 2 mm/min 的加载速率进行拉伸性能测试，试验样品按照 GB6397-86《金属拉伸试验试样》线切割制备非标准试样，具体尺寸如图 2 所示。

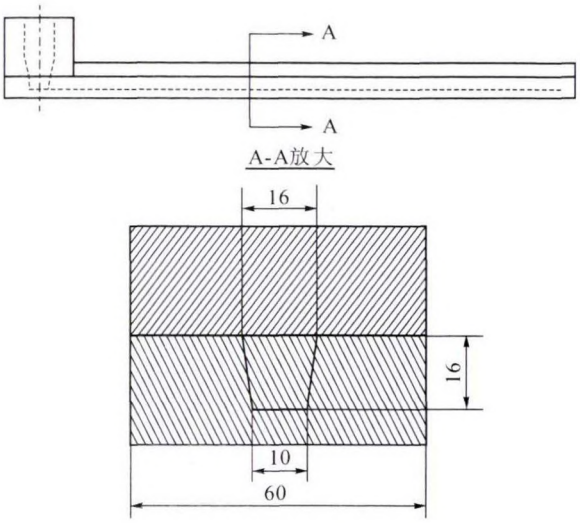


图 1 流动性测试模具示意图
Fig.1 Flow test die schematic diagram

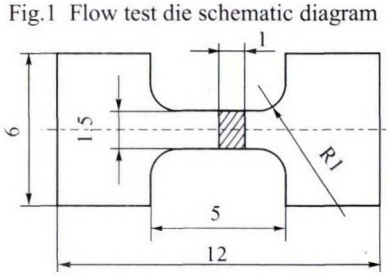
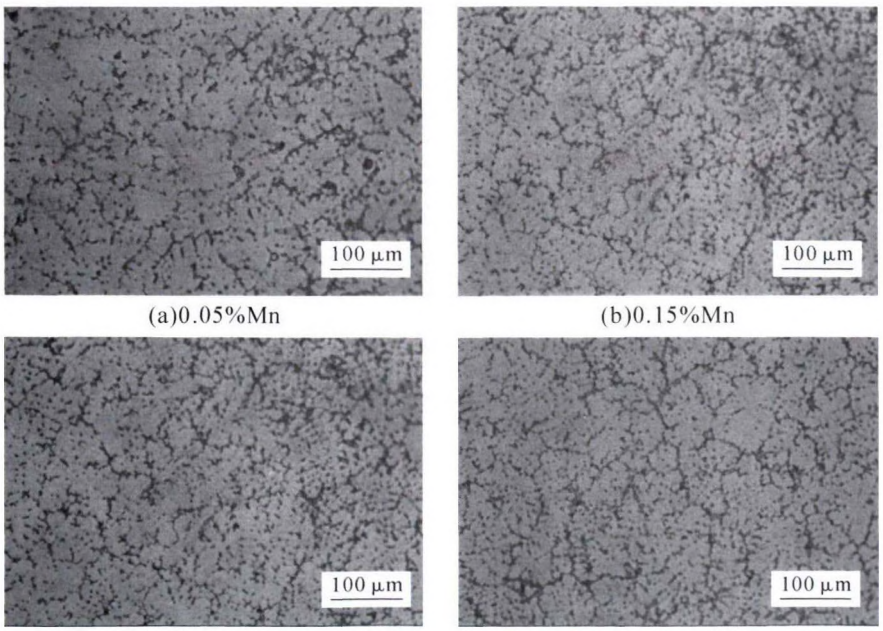


图 2 拉伸试样示意图
Fig.2 Diagram of Tensile Specimens

2 试验结果与分析

2.1 微观组织

图 3 为添加不同含量 Mn 元素时 Al-7%Mg 合金的铸态光学组织，可以看出，合金的组织均由粗大



(a)0.05%Mn (b)0.15%Mn
(c)0.18%Mn (d)0.25%Mn

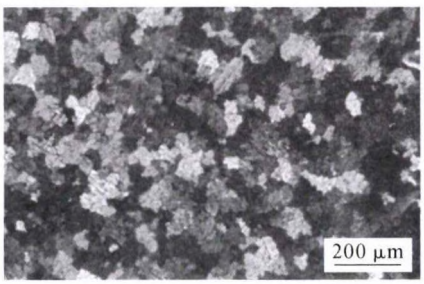
图 3 不同 Mn 含量的 Al-7%Mg 合金金相组织
Fig.3 Metallographic structure of Al-7% Mg alloy with different Mn content

的树枝晶组成，枝晶间存在较大的枝晶偏析，发生偏析的是 Mg 元素，是其较高的组分含量(6.0%)所致。对比图 1 中不同成分的合金组织可以发现，Mn 元素的加入可以减弱 Mg 元素引起的枝晶偏析（见图 3c、3d)；仅仅从光学照片观测，Mn 元素的添加对 Al-7%Mg 合金的晶粒大小无显著影响。

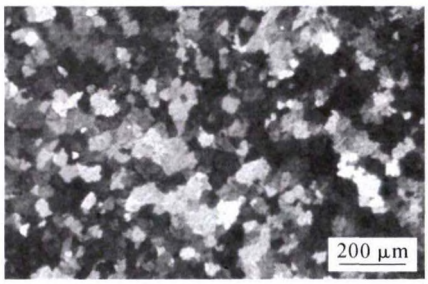
对 Mn 含量分别为 0.05%和 0.18%的试样进行电解抛光阳极覆膜后，其金相组织如图 4。从图中可以观察到，当 Mn 元素的添加量较少时，合金的晶粒较为粗大；当 Mn 元素的添加量较大时，合金的晶粒变为圆整、细小的等轴状。该结果与葛丽丽[11]等人对 Mn 含量对 Al-Mg 合金板材的高温短时退火组织的影响规律类似。

2.2　流动性

不同含量 Mn 含量的 Al-7%Mg 合金的水平直棒流动性试样见图 5。



(a)0.05%Mn



(b)0.15%Mn

图 4 Al-7%Mg 合金显微组织

Fig.4 Microstructure of Al-7% Mg Alloy

图 5 流动性测试铸件

Fig.5 Flow test castings

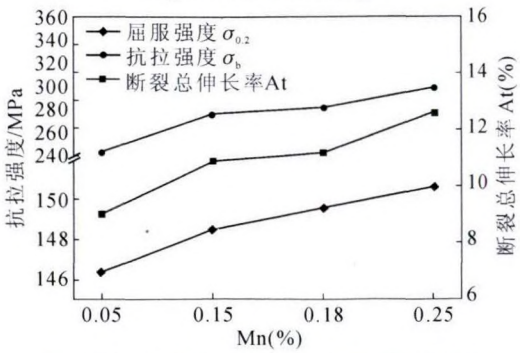


图 7 Mn 含量对 Al-7%Mg 力学性能的影响

Fig.7 Effect of Mn Content on Mechanical Properties of Al-7% Mg

从图 6 可知，当添加 0.05%~0.25%的 Mn 元素时，Al-7%Mg 合金试样的长度随 Mn 含量的添加呈现出先上升后降低的趋势。Mn 添加量为 0.05%时，Al-7%Mg 合金流动长度为 840 mm；Mn 添加量为 0.15%时，合金的流动性显著提高，平均水平流动长度达到了 900 mm；继续增加 Mn 含量至 0.18%和 0.25%时，流动性迅速降低，流动长度分别为 810 mm 和 790 mm。

2.3　力学性能

图 7 为不同 Mn 含量的 Al-7%Mg 合金的抗拉强度 σ_b，屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 及伸长率 δ。从图中可以看出，当 Mn 元素的添加量在 0.05%~0.25%的范围内时，Al-7%Mg 合金的强度和伸长率都随着 Mn 含量的增加而增大，在 Mn 元素的添加量为 0.25%时达到最大，分别为 299 MPa、151 MPa 和 12.6%。由此可见，少量的 Mn 元素能够显著提高 Al-7%Mg 合金的力学性能。

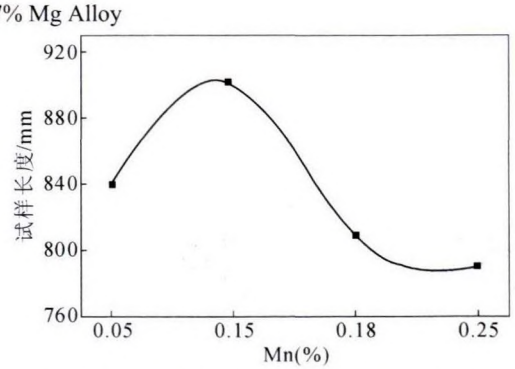


图 6 Mn 含量对 Al-7%Mg 合金流动性的影响

Fig.6 Effect of Mn Content on Fluidity of Al-7% Mg Alloy

上述实验现象说明了 Mn 是 Al-7%Mg 合金的有效辅助强化元素，其强化机理主要是固溶强化。Mn 元素可以溶入铝合金形成置换固溶体，使其发生晶格畸变，增大位错运动的阻力，使滑移难以进行，进而增强合金的强度。此外，添加 Mn 元素在 Al-7%Mg 合金中形成的含 Mn 相能够固溶杂质元素 Fe 和 Si，减少针状含 Fe 相和 Mg_2Si 相的生成，使得该合金的性能进一步得到提高[12]。微量 Mn 元素

（下转第 467 页）

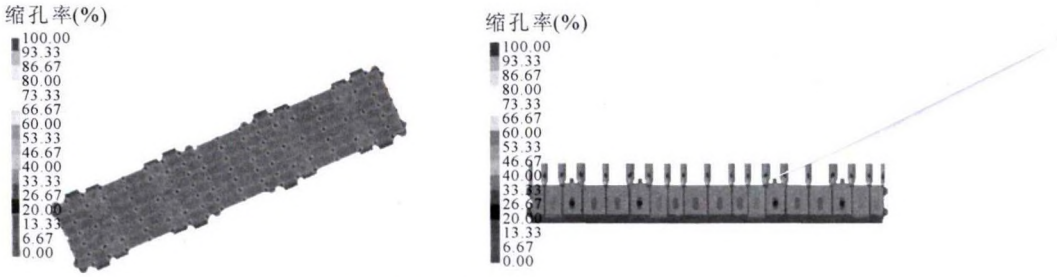


图 6 铸件缩孔缩松分布图
Fig.6 Simulation result of porosity

内部，在铸件四周有孤立的缩松缺陷显示。相对于工艺方案二，工艺方案三的缩松缺陷更加分散、分布区域减少、体积明显降低、孔隙率更小。因此，工艺方案三相对更加合理，铸件质量更易保证，实际生产中采用该工艺方案。

3　生产验证

依据工艺方案三进行生产。铸件经外观检验、尺寸检验合格，各项技术指标完全满足用户要求。铸件加工后经超声波探伤和磁粉探伤检验，无超标缺陷。结果表明，百吨级球墨铸铁铸件生产前进行铸造工艺分析及优化是合理的、必要的，同时为笔者公司今后生产同类型球墨铸铁件积累了宝贵的经验。

参考文献：

[1] 吴琼，贾晓波，孟君，等. 树脂砂地坑造型方法[J]. 铸造技术，2011，32(3)：415-417.

[2] 中国机械工程学会铸造专业学会. 铸造手册第一卷《铸铁》[M]. 北京：机械工业出版社，2010.

[3] 中国机械工程学会铸造专业学会. 铸造手册第五卷《铸造工艺》[M]. 北京：机械工业出版社，2011.

[4] 任韶安，苏文生，李玉德，等. 地坑造型生产大型灰铸铁平台[J]. 铸造，2012，61(7)：805-808.

[5] 王文清，李魁盛. 铸造工艺学[M]. 北京：机械工业出版社，1998.

[6] 任海成，赵进科，李善余. 超重型机床球墨铸铁横梁件的生产[J]. 现代铸铁，2010(4)：24-29.

[7] 柳百成. 铸件凝固过程的宏观及微观模拟仿真研究进展 [J]. 中国工程科学，2000，2(9)：29-37.

[8] 杨薇，赵俊学，宋书雅，等. 大型钢锭充型和凝固过程的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金，2014，34(2)：149-152.

（上接第 463 页）

的添加使得合金伸长率增强的主要原因是 Mg 元素偏析的减弱和晶粒细化为较小粒径的等轴晶所致。

3　结论

(1)Mn 元素的加入不但可以减弱 Al-7Mg 合金中高含量 Mg 元素引起的枝晶偏析，而且能够将该合金的晶粒转变为圆整、细小的等轴状。

(2)当添加 0.05%~0.25%的 Mn 元素时，Al-7Mg 合金的流动性随 Mn 含量的增加先增大后减小，在添加 0.15%Mn 时的流动性最好，单向流动长度可达 900 mm；合金的抗拉强度 σ_b，屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 及伸长率 δ 都随着 Mn 的添加而增大，在添加 0.25% Mn 时力学性能最好，分别为 299 MPa、151 MPa 和 12.6%。

参考文献：

[1] Okayasu M, Takeuchi S. Mechanical Properties of Cast Al-Mg5 Alloy Produced by Heated Mold Continuous Casting [J]. International Journal of Metalcasting[J]. 2017, 12 (2): 298-306.

[2] 田帅，刘桂亮，韩梦霞，等. 改善 Al-Mg 合金流动性及力学性能的新方法[J]. 精密成形工程，2019，11(01): 41-46.

[3] Ravi K R, Pillai R M, Amaranathan K R, et al. Fluidity of aluminum alloys and composites: A review [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 456(1-2): 201-210.

[4] 周士昂. 基于稀土元素 Sc 改性 Al-Mg 新型铝合金的组织控制与强化机理研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2016.

[5] 郑红梅，胡学飞，崔接武，等. 添加 Sc 元素后 Al-Mg 合金的性能和结构变化[J]. 材料热处理学报，2016，37(11): 45-49.

[6] 张晋武，白朴存，侯小虎，等. 微量 Er 对 Al-Mg-Mn 合金组织与力学性能的影响[J]. 航空材料学报，2014，34(5): 17-24.

[7] 谌红果，卫广智，马琳，等. 稀土元素钇和固溶处理对 Al-8Mg 合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺，2016(4):76-78.

[8] 吴健，古文全，薛涛，等. 稀土 Ce 对 Al-10Mg 合金组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2014，34 (1) :89-92.

[9] 戴圣龙. 铸造手册·第 3 卷：铸造非铁合金[M]. 北京：机械工业出版社，2011.

[10] 葛丽丽，程仁策，吕正风，等. Mn 含量对 Al-Mg 合金板材组织与性能的影响[J]. 金属热处理，2017，42(5): 14-17.

[11] 孙景旺，王渠东，丁文江. 铸造 Al-Mg-Mn 合金的显微组织及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金，2012，32(1): 85-89.