DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.12.004

Sc 对 AlMg5Si2Mn 合金组织与力学性能的影响

王克研[1],赵荣达[1],武晓峰[2],毕金亮[1],伍复发[1]
(1.辽宁工业大学 材料科学与工程学院,辽宁 锦州 121001;2.南昌工学院 新能源车辆学院,江西 南昌 330108)

摘　要:研究了 Sc 含量对铸态 AlMg5Si2Mn 合金的显微组织,力学性能和断裂特征的影响。结果表明,添加适量的 Sc 对 AlMg5Si2Mn 合金中的初生 α-Al 和共晶 Mg_2Si 具有显著的变质效果。随着 Sc 含量从 0 增加到 0.25%,初生 α-Al 形貌由较大的块状转变为细小的球状,共晶 Mg_2Si 的形貌由汉字状转变为纤维状或点状。Sc 在合金中形成 Al_3Sc 相,作为异质形核基底促进初生 α-Al 形核,并晶粒细化。Sc 原子富集在共晶 Mg_2Si 相的生长前沿形成成分过冷,Mg_2Si 相的生长被抑制。Sc 的添加可以提高合金的抗拉强度和伸长率,与未变质合金相比,添加 0.15%~0.25%Sc 的合金拉伸性能最佳,抗拉强度和伸长率分别提高了 20.9%和 60.4%。

关键词:AlMg5Si2Mn 合金;Sc;初生 α-Al;共晶 Mg_2Si;力学性能
中图分类号:TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)12-1249-04

Effect of Sc on Microstructure and Mechanical Properties of AlMg5Si2Mn Alloy

WANG Keyan[1], ZHAO Rongda[1], WU Xiaofeng[2], BI Jinliang[1], WU Fufa[1]
(1.School of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China; 2.School of New Energy and Automobile, Nanchang Institute of Science and Technology, Nanchang 330108, China)

Abstract: The effect of Sc content on microstructure, mechanical properties and fracture characteristics of as-cast AlMg5Si2Mn alloy was studied. The results show that adding appropriate Sc have significant deterioration effects on primary α-Al and eutectic Mg_2Si in AlMg5Si2Mn alloy. With the increase of Sc content from 0 to 0.25%, the morphology of primary α-Al changes from large block to small ball, and the morphology of eutectic Mg_2Si changes from Chinese character to fiber or dot. Sc forms the Al_3Sc phase in the alloy and as a heterogeneous nucleated substrate to promote primary α-Al nucleation and grain refinement. Sc atoms enrich in the growth front of eutectic Mg_2Si phase form subcooling components, and the growth of Mg_2Si phase is inhibited. The addition of Sc can improve the tensile strength and elongation of the alloy. Compared with the undeteriorated alloy, the alloy with 0.15%~0.25%Sc has the best tensile properties, and the tensile strength and elongation are improved by 20.9% and 60.4%, respectively.

Key words: AlMg5Si2Mn alloy; Sc; primary α-Al; eutectic Mg_2Si; mechanical properties

近年来,Al-Mg_2Si 过共晶合金作为一种颗粒增强的基体复合材料,以其高弹性模量、高耐磨性、低热膨胀率以及在大范围温度下良好的力学性能而受到学者们的广泛关注[1]。研究表明 AlMg5Si2Mn 合金作为亚共晶 Al-Mg_2Si 合金,比过共晶 Al-Mg_2Si 合金具有更显著的比刚度,比强度和良好的综合力学性能。AlMg5Si2Mn 合金不仅具有质量轻、优良的铸造性能、疲劳性和耐腐蚀性,而且还具有优异的强度和塑性,因而具有潜在的可能成为替代 Al-Si 合金的候选材料,被广泛应用于汽车结构的零部件中。然而,铸态下析出的 Mg_2Si 相较粗大,严重地割裂 Al 基体,导致应力集中,形成裂纹源,恶化合金的力学性能,限制了这类材料在生产中的应用。而在 AlMg5Si2Mn 合金凝固的过程中发生伪共晶反应,生成初生 α-Al 和 (Al+Mg_2Si) 共晶组织,其中初生 α-Al 相和共晶 Mg_2Si 相于基体中分别呈树枝状和粗迷宫状结构分布[2]。铸态下这些粗大的组织在承受工作负载的作用下,易产生应力集中,割裂合金基体,严重的影响了合金的力学性能。因此,控制 AlMg5Si2Mn 合金中初生 α-Al 相及共晶 Mg_2Si 相形貌是提高该合金综合力学性能的主要手段。

通过添加微量合金元素 Bi[3],P[4],Sr[5],Be[6],Li[7] 等进行变质处理成为了改变 Al-Mg_2Si 合金中铸态组织的主要方法。稀土 Sc 作为铝合金最有效地晶粒细化剂之一,已被成功地应用于变形铝合金的初生

收稿日期:2019-08-22
基金项目:国家自然科学基金项目(51571106),辽宁省自然科学基金项目(2015020244,201602366 和 2019-MS-171)
作者简介:王克研(1990-),辽宁本溪人,硕士生.研究方向:高强韧铝合金制备.E-mail:wangkkyy@126.com
通讯作者:伍复发(1980-),江西南康人,辽宁省特聘教授.研究方向:金属材料强韧化设计与力学行为研究.
电话:0416-4199650,E-mail:ffwooxy@163.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

α-Al 枝晶的细化。在 Al-7Si-0.6Mg 合金中添加适量的 Sc 不仅减小了 α-Al 的二次枝晶间距，而且共晶 Si 的尺寸显著减小[8]。在 A356 合金中添加 Sc 能有效地细化晶粒，导致合金流动性的提高[9]。在 Al-6Si-0.25Mg 合金中添加 0.4%Sc，使初生 α-Al 由粗的树枝晶转变为细的等轴晶[10]。因此，本文以 AlMg5Si2Mn 合金为对象，研究 Sc 对该合金铸态组织特征、力学性能的影响。

1 实验材料与方法

AlMg5Si2Mn 合金的制备使用 99.3%工业纯铝，99.1%工业纯镁和 Al-30%Si 中间合金作为原料。将铝块和 Al-30%Si 中间合金装入石墨坩埚中并在电阻炉中加热至 780 ℃直到它们完全熔化。待温度降至约 720 ℃时，将不同量的 Sc（x=0，0.5%，0.15%，0.25%，0.35%，0.45%）加入到熔体中。待充分熔解后将包裹在铝箔中的镁块（含 20%烧损）加入到熔体中。然后使用六氯乙烷将熔体除气，除杂。保温 5 min 后，将熔体倒入铁模（预热至 200 ℃）中以生产尺寸为 ϕ20 mm×80 mm 的拉伸试棒。所有用于显微组织观察的样品都从距离铸件底部 10 mm 棒材中的相同位置切割下来，进行机械研磨，使用标准程序进行抛光。使用 0.5vol.%氢氟酸（HF）水溶液蚀刻每个横截面。使用光学显微镜（OM），扫描电子显微镜和 D/max-2500X 射线衍射仪观测合金的微观组织和相结构。利用计算机控制的万能试验机以 2 mm/min 的恒定速度进行拉伸试验，测试其力学性能，每个数据是 4 个拉伸棒的平均值。

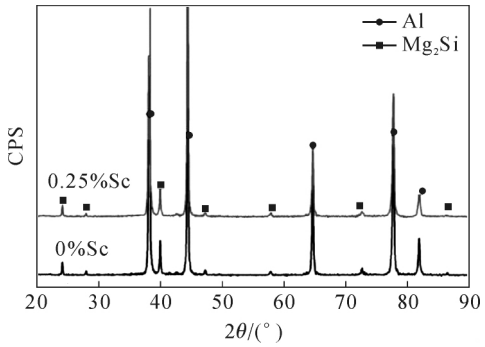


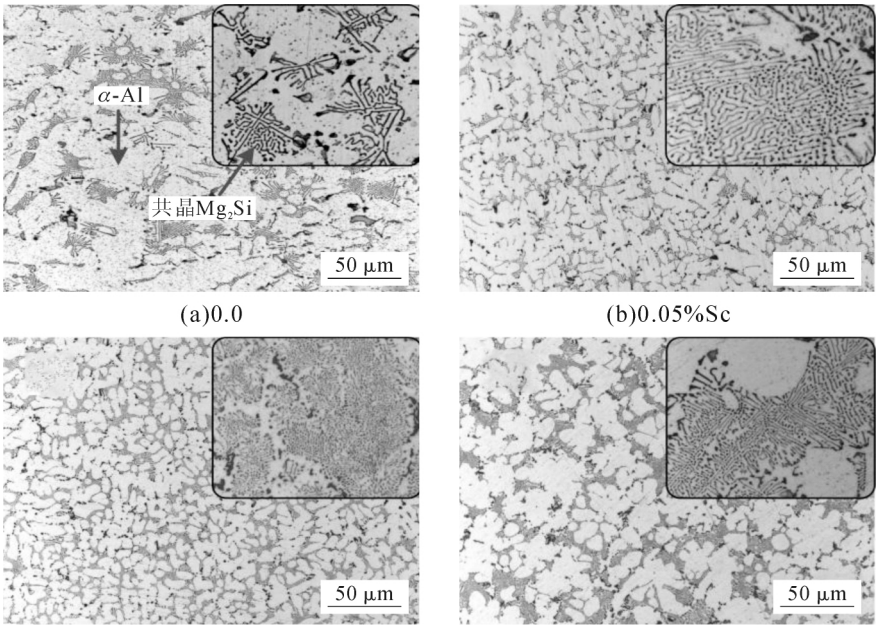
图 1 不同 Sc 含量 AlMg5Si2Mn 合金 XRD 衍射图谱
Fig.1 XRD pattern of AlMg5Si2Mn alloys with different Sc content

2 实验结果与分析

2.1 相结构与显微组织

图 1 显示了含有不同量的 Sc 的 AlMg5Si2Mn 合金的 XRD 图谱。XRD 图显示所有合金微观结构都含有 α-Al 和 Mg_2Si 相。XRD 图谱中未发现 Sc 或含 Sc 化合物峰。这是由于稀土元素 Sc 在铸态铝合金中的存在形式主要以固溶体和第二相的形式存在于基体中，当 Sc 含量在合金中含量较低时，Sc 原子以过饱和固溶体形式存在于 α-Al 基体中。

图 2 为添加不同含量 Sc 的 AlMg5Si2Mn 合金微观结构。在未变质合金中可以观察到铸态下的 AlMg5Si2Mn 合金微观结构包括初生 α-Al 和共晶 Mg_2Si 组织，其中白色块状组织为初生 α-Al，镶嵌在共晶 α-Al 基体中的黑色组织为共晶 Mg_2Si（图 2a）。添加 0.05%Sc 于 AlMg5Si2Mn 合金中，可以观察到初生 α-Al 粒径尺寸及共晶 Mg_2Si 长度显著减小，变

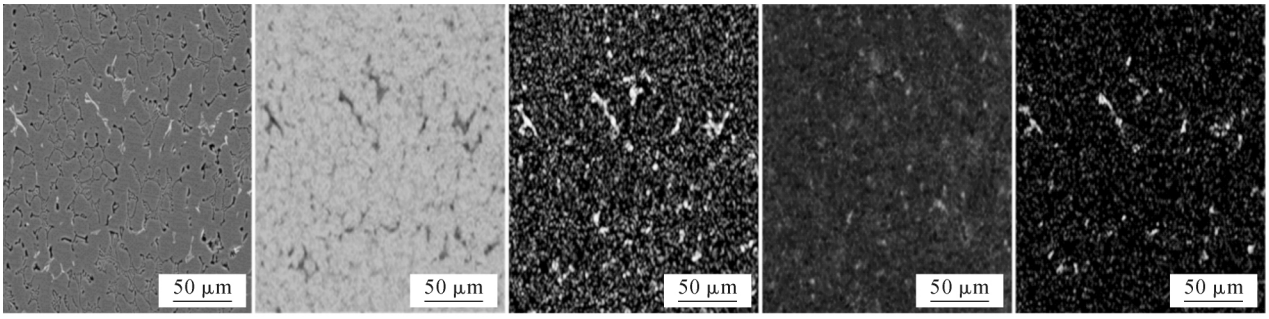


(a)0.0　(b)0.05%Sc

(c)0.2.5%Sc　(d)0.45%Sc

图 2 不同 Sc 含量 AlMg5Si2Mn 合金的显微组织
Fig.2 Microstructure of AlMg5Si2Mn alloys with different Sc contents

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)BSE　(b)Al　(c)Si　(d)Mg　(e) Sc

图 3 0.4%Sc 含量的 AlMg5Si2Mn 合金能谱分析结果

Fig.3 EDS results of AlMg5Si2Mn alloy with 0.4%Sc

质效果较为明显，初生 α-Al 发生部分球化，共晶 Mg_2Si 形貌由汉字状向纤维状，点状转变（图 2b）。当 Sc 含量添加至 0.25%时，合金变质效果最为明显。初生 α-Al 完全球化，最小粒径尺寸可达约 5 μm，共晶 Mg_2Si 呈致密点状分布（图 2c）。进一步增加 Sc 含量至 0.45%时，初生 α-Al 粒径尺寸明显增大，共晶 Mg_2Si 变质效果仍很明显（图 2d）。

图 3 为 0.4%的 Sc 变质 AlMg5Si2Mn 合金的 BSE 像和元素面扫描。图 3a 与图 3e 中可以看出 BSE 像中亮点位置与 Si 和 Sc 元素中亮点位置部分重合，这说明这部分为富 Sc 相及富 Sc 相化合物（图 3a，3c 和 3e）。除此之外还存在些 Sc 元素在共晶 Mg_2Si 周围富集。

2.2 力学性能与断裂行为

图 4 显示了 Sc 添加量对 AlMg5Si2Mn 合金拉伸性能的影响。可以看出，不同 Sc 含量的 AlMg5Si2Mn 合金抗拉强度和伸长率的变化趋势相似，即 AlMg5Si2Mn 合金的抗拉强度和伸长率随着 Sc 含量的增加而先增加然后稍微下降。未变质的 AlMg5Si2Mn 合金的抗拉强度 215 MPa，伸长率为 2.68%，而 0.15%~0.25%Sc 变质的 AlMg5Si2Mn 合金的最高抗拉强度和伸长率分别为 260 MPa，4.3%。与未变质合金相比其抗拉强度和伸长率分别提高了 20.9%和 60.4%。

图 5 显示了不同 Sc 含量 AlMg5Si2Mn 合金的

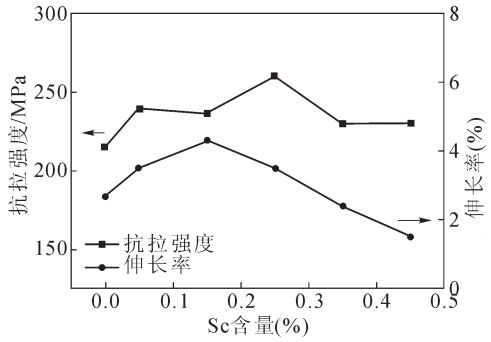


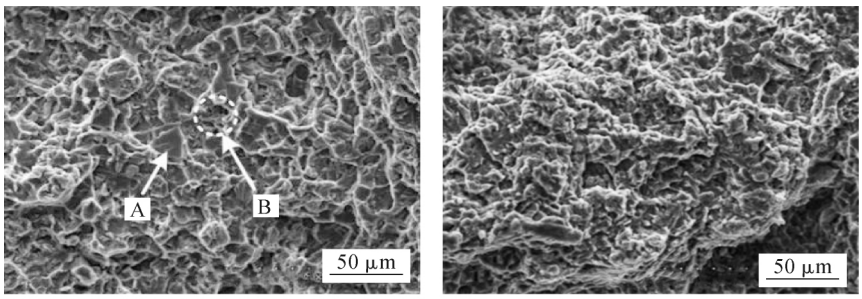
图 4 含量对 AlMg5Si2Mn 合金抗拉强度及伸长率的影响

Fig.4 Effect of Sc addition on tensile strength and elongation of AlMg5Si2Mn alloys

断裂面。可观察到未变质合金中可观察到许多如 A 点处存在光滑的撕裂平台，B 点处伴随着少许韧窝。这种光滑的平台是由于较粗的共晶 Mg_2Si 从铝基体中割裂所留下的，撕裂棱分布在平台之间。这种行为的断裂为脆性断裂（图 5a）。在 AlMg5Si2Mn 合金中添加 0.25%Sc 后，合金断裂面中韧窝尺寸进一步减小，整个断裂面由细小并且较深的韧窝组成。（图 5b）。

2.3 机理分析

随着凝固的进行，Sc 在 655 ℃发生共晶反应，Al_3Sc 粒子首先从熔体中析出[11]。因 Al_3Sc 的晶格参数 =0.4105 nm，与 α-Al 晶格参数（0.404 nm）近似相等，因此 Al_3Sc 和 α-Al 之间存在较低的晶格错配度。对于初生 α-Al 而言，Al_3Sc 可作为初生 α-Al 的



(a)0　(b)0.25

图 5 不同 Sc 含量的 AlMg5Si2Mn 合金的断口形貌

Fig.5 Fracture images of AlMg5Si2Mn alloy with different Sc contents

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

异质形核核心，使粗大块状的初生 α-Al 转变为球状（图 2c）。由于 Sc 在初生 α-Al 中的溶解度很低，随着凝固的进行 Sc 被排出到初生 α-Al 固液界面并聚集在共晶 Mg_2Si 生长面前沿，Sc 原子沿 α-Al+Mg_2Si 共晶团边缘呈网状富集（图 3a，3e），形成原子团簇在固液界面前同时形成了 Sc 的溶质层，从而影响共晶 Mg_2Si 相的生长。此类现象与 Yb,Ce 等在 Al-Si 合金中对共晶 Si 的成长前沿富集的现象相似[12,13]。另一方面，根据杂质诱导孪生机制(IIT) [14]，Sc 的吸附与聚集使得共晶组织生长中不断封锁共晶 Mg_2Si 原有的孪晶台阶，大量的凹角孪晶被促发，使 Mg_2Si 分支生长，有效的改变了共晶 Mg_2Si 的生长方向，细化了共晶组织[15]。

3 结论

（1）添加适量的 Sc 可同时变质 AlMg5Si2Mn 的初生 α-Al 相和共晶 Mg_2Si 相。随着 Sc 含量的增加，初生 α-Al 相由大块状转变为细小的球状结构，其平均尺寸减小至 5 μm。共晶 Mg_2Si 相的形态从汉字状向纤维状或点状结构转变。

（2）Sc 在合金中形成 Al_3Sc 相，作为异质形核基底促进初生 α-Al 形核使晶粒细化。Sc 原子富集在共晶 Mg_2Si 相的生长前沿形成成分过冷，Mg_2Si 相的生长被抑制。同时，Sc 原子吸附在 Mg_2Si 相内的生长面上，促使 Mg_2Si 晶体呈多支生长，形成纤维状结构。

（3）添加适量的 Sc 于 AlMg5Si2Mn 合金中能显著提高该合金的力学性能。抗拉强度和伸长率分别增加约 20.9%（从 215 到 260 MPa）和 60.4%（从 2.68%到 4.3%）。

参考文献：

[1] Farahany S, Ghandvar H, Nordin N A, et al. Effect of Primary and Eutectic Mg_2Si Crystal Modifications on the Mechanical Properties and Sliding Wear Behaviour of an Al-20Mg2Si-2Cu-xBi Composite[J]. J. Mater. Sci. Technol., 2016, 32(11): 1083-1097.

[2] Y.-S. Lee, J.-H. Cha, S.-H. Kim, et al. Modification of eutectic Mg_2Si in AlMg5Si2Mn alloy by pre-homogenization deformation treatment with different reduction conditions [J]. Mater. Charact., 2018, 141: 388-397.

[3] X.-F. Wu, Y. Wang, K.-Y. Wang, et al. Enhanced mechanical properties of hypoeutectic Al-10Mg_2Si cast alloys by Bi addition [J]. J. Alloy. Compd., 2018,767: 163-172.

[4] Yeganeh S E V, Razaghian A, Emamy M. The influence of Cu-15P master alloy on the microstructure and tensile properties of Al-25wt% Mg_2Si composite before and after hot-extrusion [J]. Mater. Sci. Eng. A, 2013, 566: 1-7.

[5] Qin Q D, Zhao Y G, Cong P J. Strontium modification and formation of cubic primary Mg_2Si crystals in Mg_2Si/Al composite [J]. J. Alloy. Compd., 2008, 454 (1-2): 142-146.

[6] Azarbarmas M, Emamy M, Rassizadehghani J, et al. The influence of beryllium addition on the microstructure and mechanical properties of Al-15%Mg_2Si in-situ metal matrix composite [J]. Mater. Sci. Eng. A, 2011,528(28): 8205-8211.

[7] Hu X, Jiang F, Ai F, et al. Effects of rare earth Er additions on microstructure development and mechanical properties of die-cast ADC12 aluminum alloy[J]. J. Alloy. Compd., 2012, 538: 21-27.

[8] Xu C, Xiao W L, Hanada S, et al. The effect of scandium addition on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloy: A multi-refinement modifier [J]. Mater. Charact., 2015, 110 (12): 160-169.

[9] Prukkanon W, Srisukhumbowornchai N, Limmaneevichitr C. Influence of Sc modification on the fluidity of an A356 aluminum alloy [J]. J. Alloy. Compd., 2009, 487(1-2): 453-457.

[10] Patakham U, Kajornchaiyakul J, Limmaneevichitr C, Grain refinement mechanism in an Al-Si-Mg alloy with scandium [J]. J. Alloy. Compd., 2012, 542: 177-186.

[11] Norman A F, Prangnell P B, McEwen R S. The solidification behaviour of dilute aluminium-scandium alloys [J]. Acta Mater. , 1998,46:5715-5732.

[12] Li Q L, Xia T D, Lan Y F, et al. Effect of rare earth cerium addition on the microstructure and tensile properties of hypereutectic Al-20%Si alloy[J]. J. Alloys Compd. ,2013, 562 :25-32.

[13] Li Q, Li B, Li J, et al. Effect of yttrium addition on the microstructures and mechanical properties of hypereutectic Al-20Si alloy[J]. Mater. Sci. Eng. A, 2018, 722: 47-57.

[14] Lu S Z, Hellawell A. The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: impurity induced twinning[J]. Metall. Trans. A ,1987,18: 1721-1733.

[15] X.-F. Wu, K.-Y. Wang, F.-F. Wu, et al. Simultaneous grain refinement and eutectic Mg_2Si modification in hypoeutectic Al-11Mg_2Si alloys by Sc addition[J]. J. Alloy. Compd., 2019, 791: 402-410.

杭州文特机电有限公司

热处理炉、加热炉、工业自动化工程、环保节能工程、机电设备的设计、制造、加工、安装、技术开发、技术咨询、技术服务。工业自动化设备、仪器仪表、工业炉窑配件、计算机等的生产、批发、零售。



地址：杭州市西湖区万塘路 262 号 6 号楼 5-65 室
厂址：长兴县林城镇午山岗开发区
联系人：丁为兵
电话：15088362822
传真：0572-6087688
邮箱：dwb150@163.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net