DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2019.11.006

Bi 含量对 Al–Mg_2Si 合金的微观组织及拉伸性能的影响

房　敏[1]，王克研[2]，赵荣达[2]

(1. 国家能源集团神东设备维修中心，内蒙古 鄂尔多斯 017200；2. 辽宁工业大学 材料科学与工程学院，辽宁 锦州 121000)

摘　要：针对国家能源集团煤炭企业的采煤设备部件偶合器力学性能较差的问题，利用金相、XRD 和力学性能测试等方法研究了 Bi 含量对铸态 Al-Mg_2Si 合金的微观组织及拉伸性能的影响。结果表明，合金元素 Bi 对合金中的初生和共晶 Mg_2Si 均具有显著的变质效果。当 Bi 含量增加到 0.3%时，初生 Mg_2Si 的形貌从粗大尖角多边形变成平角多面体形状，平均粒径从 43 μm 下降至 24 μm；同时，共晶 Mg_2Si 相从迷宫状变为短纤维状或点状。当 Bi 含量超过 0.5%时，共晶 Mg_2Si 呈现出过变质现象。Bi 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 0.5%Bi 的合金抗拉强度和伸长率分别提高了 34.9%和 90.5%。

关键词：变质；组织细化；Mg_2Si 形貌；拉伸性能

中图分类号：TG146.2; TG113　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2019)11-1156-04

Effect of Bi Content on Microstructure and Tensile Properties of Al–14Mg_2Si Alloy

FANG Min[1], WANG Keyan[2], ZHAO Rongda[2]

(1. CHN Energy Shendong Equipment Maintenance Center, Erdos 017200, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract: Aiming at the poor mechanical properties of coupler of coal mining equipment components in coal mining enterprises of national energy group, the influence of Bi content on microstructure and tensile properties of Al-14Mg_2Si alloy was studied by means of metallography, XRD and mechanical property test. The results show that the alloy element Bi has significant deterioration effect on the primary and eutectic Mg_2Si in the alloy. When the Bi content increased to 0.3%, the morphology of primary Mg_2Si changes from thick and sharp polygon to flat polyhedron, and the average particle size decreased from 43 μm to 24 μm. At the same time, the eutectic Mg_2Si phase changes from labyrinth to short fiber or dot. When Bi content exceeds 0.5%, eutectic Mg_2Si presents metamorphism. Bi can improve the tensile strength and elongation of the alloy. The tensile strength and elongation of the alloy with 0.5%Bi are increased by 34.9% and 90.5%, respectively, compared with that of the unspoiled alloy.

Key words: modification; microstructure refinement; Mg_2Si morphology; mechanical property

近些年，国家能源集团煤炭企业的采煤设备部件偶合器在服役过程中，发现传统铝合金材质（ZL104）的偶合器存在强度与塑性较差的问题，严重影响了设备使用的寿命。因此，开发一种新轻量化的适用于采煤设备偶合器的新高性能铝合金十分必要。作为一种新的颗粒金属基复合材料，原位 Mg_2Si 颗粒增强金属基复合材料受到国内外研究者们的重视。由于在凝固过程中可形成金属间化合物 Mg_2Si，Al-Mg_2Si 原位金属基复合材料具有高熔点、低密度、高硬度、低热膨胀系数和相当高的弹性模量等特点，有望作为铝合金的候选材料广泛应用于航空航天和汽车领域[1]。

在制备 Al-Mg_2Si 原位金属基复合材料的过程中，传统铸造工艺易产生粗大的初生或共晶 Mg_2Si 相。由于 Mg_2Si 相本身硬而脆，可导致基体严重分离；初生 Mg_2Si 相的尖端和边缘应力集中较大，易导致晶界处或初生 Mg_2Si 相本身开裂，进而导致材料的力学性能特别是伸长率显著降低。变质作为一种

收稿日期：2019-05-22

作者简介：房　敏(1981-)，女，辽宁海城人，硕士，高级工程师. 主要从事采煤设备零部件修复及制造研究和铝合金制备方面的工作. 电话：18904770188，E-mail：30057194@qq.com

通讯作者：赵荣达(1981-)，辽宁海城人，博士，副教授. 研究方向：高强韧铝合金制备. 电话：18524164576，E-mail：rongdazhao@lnut.edu.cn

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

简单而有效的技术，通常用于调整的 Al-Si 合金中 Si 颗粒的形态和尺寸。近期，国内外学者对 Al-Si，Al-Mg_2Si，Al-Si-Mg_2Si 等合金中添加 Nd、La、Sr、Gd 和 Na[2]对初生和共晶 Si 或 Mg_2Si 相的影响进行了研究[3]，也探讨了 Bi 对铸态 Al-Si 合金中 Si 相的形态和尺寸的影响。其中，李贞宽等[7]研究发现 Bi 使亚共晶 Al-Si 合金中的共晶 Si 从粗针状变为细纤维状。Farahany 等[8]也报道了添加 Bi 将 Al-7Si-0.4Mg 合金中的板状共晶硅细化成了片状结构。根据 Mg_2Si 和 Si 相在铝合金中的晶体结构和结晶过程之间的相似性，Bi 可能对 Mg_2Si 相具有类似的变质效果。因此，本文研究了 Bi 含量对 Al-Mg_2Si 合金中共晶和初生 Mg_2Si 相的变质效果及力学性能的影响。

1　试验材料与方法

使用 99.3%的工业纯铝、99.1%镁锭和 98.7%硅块制备 Al-Mg_2Si 合金，合金成分 w(%)为：8.89Mg、5.14Si，其余为 Al。将铝锭和部分硅块装入石墨坩埚中并在电阻炉中加热；然后将剩余的硅块在 800 ℃加入到熔体中，直到它们完全熔化。当温度降至约 720 ℃时，将包裹在铝箔中的镁块加入到熔体中。然后使用六氯乙烷将熔体除气，并将不同量 w(%)的纯 Bi(0、0.1、0.3、0.5、0.7、0.9)加入到熔体中。在充分搅拌后，将熔体浇入预热至 200 ℃钢模中以制备直径 30 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，使用标准程序抛光。使用 0.5vol.%氢氟酸水溶液浸蚀每个横截面。使用光学显微镜和 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，取三个拉伸试棒的平均值。

2　实验结果及讨论

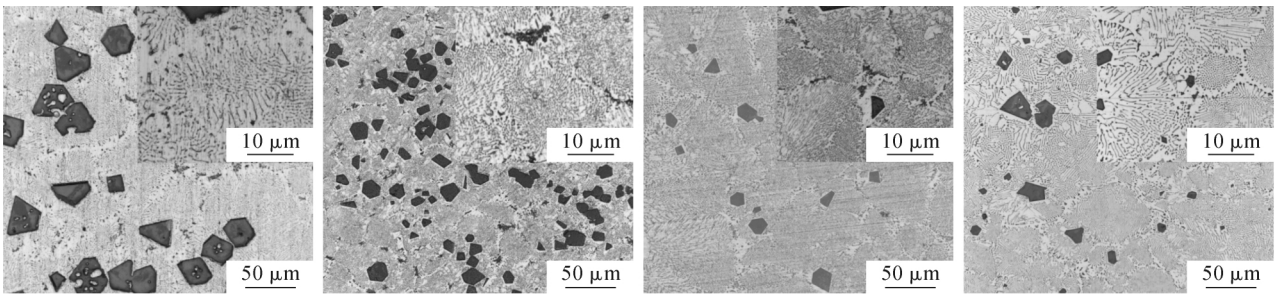
2.1　显微组织

图 1 为不同 Bi 含量 Al-Mg_2Si 合金的金相组织。可以看出，初生 Mg_2Si 相呈现黑色颗粒状结构，(α-Al+Mg_2Si)二元共晶体为灰色的基底，初生 Mg_2Si 相周围的白色相是 α-Al 相。从图 1(a)可以看出，未变质合金的初生 Mg_2Si 相形貌显示粗大尖角多面体形状并伴随孔洞，其平均直径约为 43 μm；但其尺寸分布不均匀，最大接近 60 μm，最小仅约为 10 μm。Bi 的加入对初生 Mg_2Si 相产生了变质效果，其变质效果取决于 Bi 的添加量。当 Bi 添加量为 0.3%时，中间带有孔洞的初生 Mg_2Si 相消失，其形貌从粗大尖角多边形变成平角多面体形状，其平均尺寸降低到约 24 μm，见图 1(b)；当 Bi 的添加量增加到 0.5%时，初生 Mg_2Si 相较 0.3%Bi 添加的尺寸未发生显著改变，但仍略有减小，见图 1(c)。当 Bi 的添加量进一步增加至 0.9%时，一些粗大的 Mg_2Si 相再次形成，但是尺寸小于未变质合金的，如图 1(d)所示。

由在图 1(a)中插入的局部放大金相图可知，未添加 Bi 的共晶 Mg_2Si 相在共晶组织中为迷宫状结构。随着 Bi 添加至 0.3%时，共晶 Mg_2Si 相变成纤细的片状结构，并在 Bi 添加量为 0.5%时 Mg_2Si 相变成非常短的纤维状或点状结构，如图 1(c)，进一步增加 Bi 的添加量合金共晶组织再次粗化，如图 1(d)。

2.2　力学性能

图 2 为不同的 Bi 添加量对 Al-Mg_2Si 合金力学性能的影响。从结果中可以看出，不同 Bi 含量的合金抗拉强度和伸长率的变化趋势相似，即合金的抗拉强度和伸长率随着 Bi 含量的增加而先增大然后稍微下降。未变质的 Al-Mg_2Si 合金的抗拉强度为 215 MPa，伸长率为 2.1%。当 Bi 含量在 0.5%时 Al-Mg_2Si 合金的抗拉强度达到 290 MPa，伸长率达



(a)0.0　(b)0.3%　(c)0.5%　(d)0.9%

图 1　不同 Bi 含量 Al-Mg_2Si 合金的显微组织

Fig.1　Microstructure of Al-Mg_2Si alloys with different Bi content

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

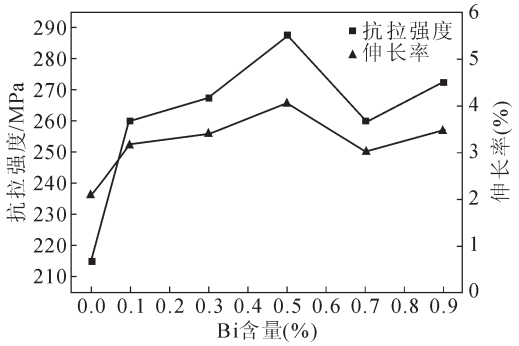


图 2 不同 Bi 的加入量对 Al-Mg_2Si 合金抗拉强度及伸长率影响

Fig.2 Effects of different Bi additions on tensile strength and elongation of Al-Mg_2Si alloy

到 4.0%。其中抗拉强度及伸长率较未变质合金分别增大了 34.9%和 90.5%。其它含量 Bi 变质合金的抗拉强度和伸长率都较未变质的有所提高。

2.3 讨论

图 3 为不同 Bi 含量的 Al-14Mg_2Si 合金变质前后的 XRD 衍射图谱。可以看出，未添加 Bi 的 Al-Mg_2Si 合金由 α-Al 和 Mg_2Si 两相组成。经过不同含量 Bi 变质后，合金衍射峰值略有改变，但仍由 α-Al 和 Mg_2Si 两相组成。XRD 物相分析并未检测到含 Bi 相，这可能是由于 XRD 检测精度范围内并未检测到微量 Bi 的存在。

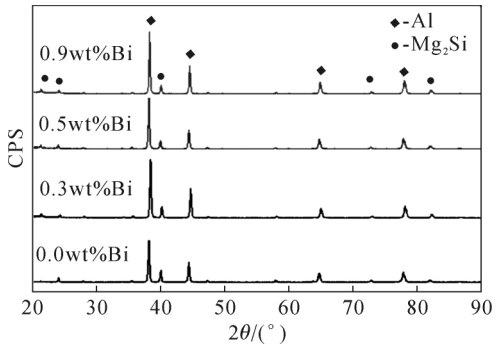


图 3 不同含量 Bi 对 Al-Mg_2Si 合金 XRD 衍射图谱

Fig.3 XRD patterns of Al-Mg_2Si alloy with Bi of different contents

通过添加 Bi 来细化 Mg_2Si 晶体的原因可能与凝固阶段 Mg_2Si 的固 / 液界面前沿的 Bi 偏析引起的成分过冷有关。Wu 等研究发现[9]Bi 分布在晶粒之间。因此，可以认为，由于 Bi 在 Al 基体中的溶解度极低，Bi 元素很可能在 Mg_2Si 的生长界面处聚集，导致合金熔体中的局部成分过冷。随着 Bi 浓度的增加，成分过冷进一步增加。当 Bi 浓度达到一定程度时，Mg_2Si 相的生长受到抑制，晶体变得细小（图 1c）。此外，Bi 显著降低了 Al 合金的表面张力和 Al 与 Si[10]之间的接触角，导致铝液能够更容易地润湿硅相并富集在硅生长前沿，从而限制其增长[8]。由于 Mg_2Si 和 Si 相约晶体结构具有相似性，这也可以用来解释 Bi 对 Mg_2Si 晶体变质的影响。另外，由于 Bi 在 Mg_2Si 中有较高的溶解度，同时 Bi 原子具有较大的尺寸半径，因此固溶在 Mg_2Si 中的 Bi 可能使 Mg_2Si 晶格产生变形，从而改变了 Mg_2Si 晶体的表面能，起到阻止和抑制 Mg_2Si 的各向异性生长和改变枝晶形态的作用。

Al-Mg_2Si 合金拉伸性能的变化主要是由于初生和共晶 Mg_2Si 相平均尺寸的变化所造成。对于粒状初生相，基体受到载荷发生塑性变形，并且在拉伸过程中应力通过界面转移至粒子。未变质合金中的初生粗大 Mg_2Si 相中存在较大的缺陷，这造成其具有较低的断裂应力[11]，易于导致合金产生裂纹。当合金受到单向轴拉伸载荷时，初生 Mg_2Si 相首先断裂，断裂的 Mg_2Si 晶体裂纹尖端的应力增加，裂纹扩展快速发生，导致整个合金的过早失效和低断裂强度。然而，Al-Mg_2Si 合金变质后具有良好形貌的初生 Mg_2Si 相，在受到应力后不会过早开裂，延缓了基体中裂纹的形成和扩展。因此，变质后的合金具有更好的塑性和强度(图 2)。同时较细小的共晶 Mg_2Si 相与基体的结合良好，可以有效抑制共晶 Mg_2Si 与基体界面上裂纹的产生和扩展，也有助于变质 Al-Mg_2Si 合金的拉伸性能的进一步提高。

3 结论

(1)添加适量的 Bi 可同时变质 Al-Mg_2Si 合金的初生和共晶 Mg_2Si 相。Bi 含量为 0.5%时，变质效果最好；初生 Mg_2Si 相的形貌由粗大尖角多面体转变为多边形形状，尺寸从 43 μm 减小至 24 μm；共晶 Mg_2Si 相的形态从薄片状变为短纤维状或点状结构。

(2)Bi 变质可提高 Al-Mg_2Si 合金的力学性能。经 0.5%Bi 变质后，抗拉强度和断裂伸长率分别从未变质的 215 MPa 和 2.1%增加至 290 MPa 和 4.0%。

参考文献：

[1] Farahany, 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-20Mg_2Si-2Cu-xBi composite [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32 (11): 1083-1097.

[2] Emamy M, Khorshidi R, Honarbakhsh R A. The influence of pure Na on the microstructure and tensile properties of Al-Mg_2Si metal matrix composite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (13-14): 4337-4342.

（下转第 1162 页）

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

（3）T6 热处理工艺可以提高试样电导率，随着时效温度的提高电导率逐渐提高，当时效温度为190 ℃时，电导率提升较为显著，最高达到23.8 ms/m，但其力学性能下降也比较明显。

综合以上实验，采用含 Ti 含量≤0.03%的 AlSi10Mg 合金，采用 Sr 变质工艺，同时将热处理时效温度调整为 190 ℃，最终实现零件的电导率达到 23.5 ms/m 以上的目标，并可实现批量生产。

参考文献：

[1] Wang M X, Wang S J, Liu Z Y, et al. Effect of B/Ti mass ration grain refining of low-titanium aluminum produced by electrolysis [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 416 (1-2): 312-316.

[2] 杨涤心，夏青，杨留栓，等. 铸造铝–硅合金的电导率与化学成分[J]. 特种铸造及有色合金，2002，22(4): 58-60.

[3] Shabestari S G, Miresmaeili S M, Boutorabi M A. Effects of Sr-modification and melt cleanliness on melt hydrogen absorption of 319 aluminium alloy [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38: 1901-1907.

[4] 刘相法，费振义，乔进国，等. Al-Si 合金中 Si 相的团粒化研究[J]. 铸造，2003，52(8)：538-541.

（上接第 1158 页）

[3] 王孝良，周崎，王喆. Nd 对原位自生 Mg_2Si/Al 复合材料的变质作用[J]. 热加工工艺，2013，42(8)：115-120.

[4] 陈继飞，杨军军. 稀土 La 对 Al-Si 合金的变质作用机理研究[J]. 铸造技术，2008，29(5)：658-661.

[5] Qin Q D, Zhao Y G, Liu C, et al. Strontium modification and formation of cubic primary Mg_2Si crystals in Mg_2Si/Al composite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 454 (1-2): 142-146.

[6] 王克研，武晓峰，高欣宇，等. Gd 对 Al-5Mg-2Si-Mn 合金组织与力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金，2018，38(11)：1244-1247.

[7] 李贞宽，边秀房，韩娜，等. Bi 对亚共晶 Al-Si 合金组织和性能的影响[J]. 铸造技术，2007，28(11)：1486-1488.

[8] Farahany S, Ourdjini A, Idris M H, et al. Effect of bismuth on microstructure of unmodified and Sr-modified Al-7Si-0.4Mg alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21 (7): 1455-1464.

[9] Wu Xiaofeng, Wang Zhe, Zhang Guangan, et al. Effect of Bi modification treatment on microstructure, tensile properties, and fracture behavior of cast Al-Mg2Si metal matrix composite [J]. China Foundry, 2013,1(10):18-23.

[10] Papworth A, Fox P. The disruption of oxide defects within aluminium alloy castings by the addition of bismuth[J]. Materials Letter, 1998, 35(3-4): 202-206.

[11] Kiser M T, Zok F W, Wilkinson D S. Plastic flow and fracture of a particulate metal matrix composite [J]. Acta Mater, 1996, 44(9): 3465-3476.

《特种铸造及有色合金》杂志征订启事

期刊简介：《特种铸造及有色合金》杂志，是中国科学技术协会主管，中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所主办的中文核心期刊，为国内外权威数据库及检索系统收录，并荣获全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖和新中国 60 年有影响力的期刊。

主要内容：各种（黑色和有色合金）特种铸造方法，如：熔模铸造、压力铸造、半固态铸造、金属型铸造、离心铸造、连续铸造、壳型铸造、消失模铸造（实型铸造）及电磁铸造等方面的理论、工艺、设备、造型材料、测试与控制、计算机应用技术等；各种（砂型铸造及特种铸造）有色合金及复合材料的熔炼和铸造工艺、凝固理论、测试与控制、计算机应用等方面的科研成果及生产经验，并介绍上述内容的国内外发展动向和学术、技术交流活动消息等。



期刊订阅：本刊为月刊，邮发代号 38-109，20 元 / 期，全年共 12 期，邮局可订，平邮免邮费。合订本和专刊、光盘可向本刊编辑部邮购。

联系方式：

地址：武汉市江岸区江大路 26 号（430019）

电话：027-85358206/85486024/85358127（传真）

邮箱：tzzz@special-cast.com **网址：**www.special-cast.com

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