DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.11.002

Bi 对 Al–5Mg–2Si–0.6Mn 合金的组织及力学性能的影响

王克研,赵荣达,毕金亮,武晓峰,伍复发
(辽宁工业大学 材料科学与工程学院,辽宁 锦州 121001)

摘　要:研究了 Bi 含量对 Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金铸态组织、相结构和成分、力学性能和断口形貌的影响。结果表明,当 Bi 含量为 0.3%时,具有最明显的变质效果。Bi 富集在共晶 Mg_2Si 生长界面前端产生成分过冷,减小了液相的实际过冷度,使共晶 Mg_2Si 的生长速度被限制,共晶 Mg_2Si 相从变质前的粗纤维状转变成细小的点状纤维。合金的力学性能显著提高,抗拉强度、伸长率分别由未变质的 205 MPa、2.8%增加至 240 MPa、5.3%,分别增加了 17.1%、89.3%。

关键词:Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金;Bi;变质;微观组织;力学性能

中图分类号:TG113; TG142.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)11-1141-04

Effect of Bi on Microstructure and Mechanical Properties of Al–5Mg–2Si–0.6Mn Alloy

WANG Keyan, ZHAO Rongda, BI Jinliang, WU Xiaofeng, WU Fufa
(School of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: The effects of Bi content on the microstructure, phase structure and composition, mechanical properties and fracture morphology of as-cast Al-5Mg-2Si-0.6Mn alloy were studied. The results show that when Bi content is 0.3%, it has the most obvious deterioration effect. Bi enrichment generates component supercooling at the front end of eutectic Mg_2Si growth interface, which reduces the actual supercooling degree of the liquid phase and limits the growth speed of eutectic Mg_2Si. Eutectic Mg_2Si phase changes from coarse fiber to fine point fiber before metamorphism. The mechanical properties of the alloy are significantly improved. The tensile strength and elongation of the alloy are increased from 205 MPa and 2.8% to 240 MPa and 5.3%, respectively, increasing by 17.1% and 89.3%.

Key words: Al-5Mg-2Si-Mn alloy; Bi; modification; microstructure; mechanical properties

Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金是以 Mg_2Si 相为强化相的高强韧铝镁硅合金[1]。该合金中因镁含量较高,而具有更高的强度,可以广泛应用于汽车及航空航天等领域。该合金中的主要强化相为共晶 Mg_2Si,其铸态组织呈粗大的宽片层状和针状[2],严重地割裂 Al 基体,产生应力集中,进而促进了裂纹源的形成,使合金的塑韧性能显著减小。如果这种粗宽片层状的共晶 Mg_2Si 相得以细化, 就能显著的提高该合金力学性能,将利于该合金在工业生产中的推广及普遍应用。

变质处理是一种改善含 Mg_2Si 相 Al 合金中初生和共晶 Mg_2Si 相形貌和大小的简单而有效的工艺措施。通过向合金熔体中加入 La[3]、Nd[4]、Sr[5]、Li[6]、Na[7]等变质剂元素,晶体的生长方式因 Mg_2Si 相的形核率增加而改变,进而 Mg_2Si 相有效地细化,提高了合金的力学性能。研究表明,在 Al-Mg-Si 合金中 Bi 的加入对 Si 相有显著的细化作用[8]。在 Al-20Mg2Si-2Cu 合金中 Bi 的加入可使粗大的片层状 Mg_2Si 转变成细纤维状结构[9]。因此,本文以亚共晶 Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金为对象,研究稀土元素 Bi 对该合金相结构及铸态组织特征、力学性能和断口形貌的影响。

1　实验材料和方法

实验原料采用 99.3% Al,99.1% Mg,98.7% Si,Al-30%Mn 中间合金,依次加入到电阻炉坩埚中熔化,熔化温度保持在 780 ℃。待合金熔化降温至 740±5 ℃时加入 Al-5.30%Bi 中间合金,静置 10 min,使合金

收稿日期:2019-07-30
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,硕士研究生.研究方向:新型铝合金的研究.E-mail: wangkkyy@126.com
通讯作者:伍复发(1980-),江西南康人,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

充分溶解扩散以保证 Bi 元素的均匀。利用压勺将用铝箔包好的 Mg 块加入到熔融状态的原料中（含镁烧损量为 20%）。随后加入六氯乙烷进行除气除渣，搅拌撇渣后，将熔体倒入 200 ℃预热的钢模中，浇铸拉伸试棒。

经线切割从距离拉伸试棒冒口 3 cm 处切下金相试样，经机械研磨、抛光、5%HF 的腐蚀后，使用光学显微镜，Hitach S3000 扫描电镜、D/max-2500X 射线衍射仪（Cu Kα 辐射）检测该合金微观结构。

使用万能力学试验机在室温下以 1 mm/min 的应变速率进行拉伸试验，拉伸试棒的标距尺寸为 70 mm×ϕ12 mm，测量合金抗拉强度和断裂伸长率。

2 实验结果与分析

2.1 相结构与显微组织

图 1 为 Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金经 Bi 变质前后的 XRD 衍射图谱。从图中看出，未经 Bi 变质的 Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金由 α-Al 和 Mg_2Si 两相组成。而经过 0.3wt%Bi 变质合金的 XRD 衍射峰的强度发生变化，但合金的相结构未发生显著变化，依然为 α-Al 和 Mg_2Si 两相。

图 2 为 Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金加入不同含量 Bi 的金相显微组织。从结果中可以看出，未添加 Bi 时，可以观察到合金微观结构包括初生 α-Al 和共晶 Mg_2Si 组织，其中箭头所指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）。未变质合金中的共晶 Mg_2Si 呈现出针状及粗大的层片状结构，初生 α-Al 呈大块状结构。随着合金中 Bi 元素的加入，共晶 Mg_2Si 和初生 α-Al 发生显著细化，尤其是共晶 Mg_2Si 较为明显。其中，添加 0.3%Bi 的合金其共晶 Mg_2Si 最为细小，共晶 Mg_2Si 转变为细的纤维状、点状结构（图 2c）。初生 α-Al 由大块状转变成球状，其粒径大幅度减小。继续增加 Bi 的含量至 0.7%时，共晶 Mg_2Si 和初生 α-Al 尺寸开始增大，初生 α-Al 与共晶 α-Al 相界面处存在少量化合物（图 2d）。

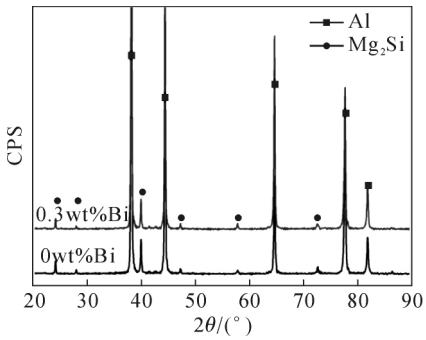
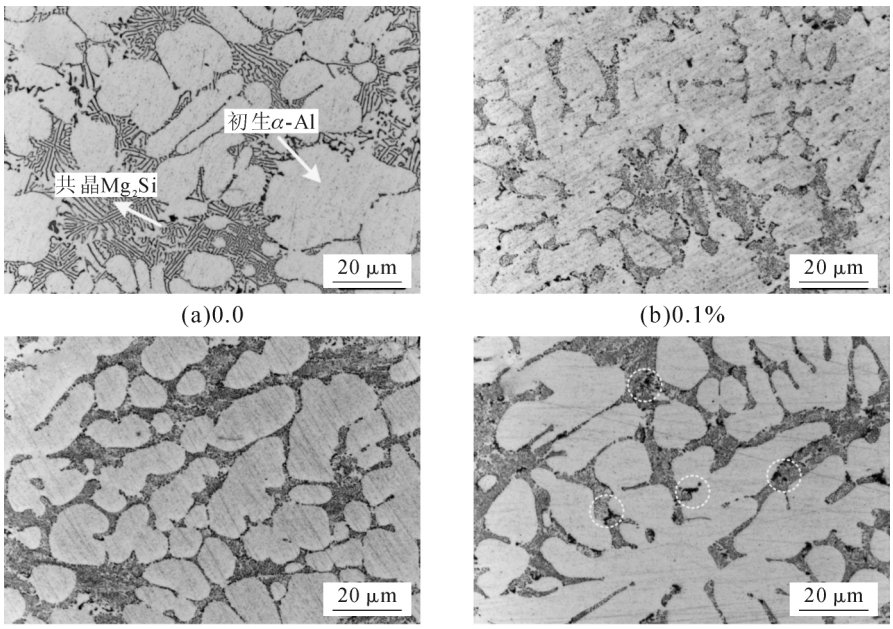


图 1 不同 Bi 含量 Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金 XRD 衍射图谱
Fig.1 XRD pattern of Al-5Mg-2Si-0.6Mn alloys with different Bi content

2.2 力学性能

图 3 为 Bi 含量对 Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金抗拉强度及伸长率的影响。从结果中看出，Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金未进行变质处理的抗拉强度与伸长率分别为 205 MPa 和 2.8%。随着合金中加入 Bi 元素进行变质处理，其抗拉强度和伸长率呈现先增加而后降低的变化趋势。其中，当 Bi 为 0.3%的合金性能为最佳抗拉强度由未变质的 205 MPa 增加至 240 MPa，伸长率由 2.8%增加至 5.3%，与未变质合金相比，其



(a)0.0 (b)0.1% (c)0.3% (d)0.7%

图 2 不同 Bi 含量 Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金的显微组织
Fig.2 Microstructure of Al-5Mg-2Si-0.6Mn alloys with Bi contents

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

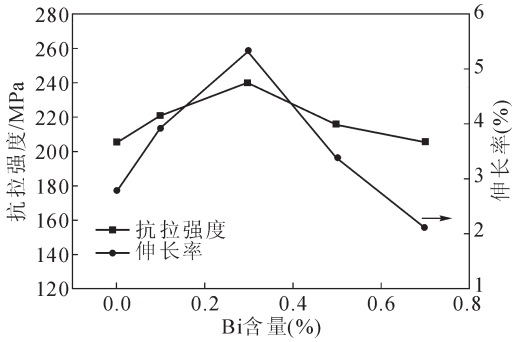


图 3 Bi 含量对 Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金抗拉强度及伸长率的影响

Fig.3 Effect of Bi on tensile strength and elongation of Al-5Mg-2Si-0.6Mn alloys

抗拉强度和伸长率分别增加了 17.1%和 89.3%。

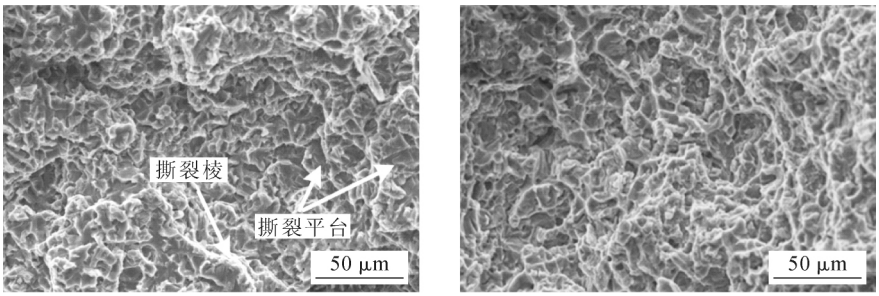
2.3 断口形貌

图 4 为不同 Bi 含量对 Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金的断口形貌的影响。从图中可清楚地看到，未添加稀土变质的合金断口表面主要由许多不连续的撕裂平台、部分撕裂棱及少量韧窝组成（图 4a）。添加少量的 Bi（0.3wt%）后，整个断面撕裂平台显著减小，韧窝分布密集，韧窝尺寸较小，呈现明显的韧性断裂特征（图 4b）。

2.4 讨论分析

因 Bi 原子尺寸半径较大且在 Mg_2Si 中有较好的溶解度，所以 Bi 添加到 Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金中能使 Mg_2Si 晶格产生相应的晶格畸变，从而 Mg_2Si 晶体的表面能被改变，限制了 Mg_2Si 的生长[10]。另一方面，由于 Bi 在 Al 基体中的极低的溶解度，随着凝固的进行，被排到固液界面的 Bi 富集在共晶 Mg_2Si 生长界面前端，产生成分过冷，降低了界面前沿处液体的平衡结晶温度，进而减小液相的实际过冷度，共晶组织的生长速度被限制，使共晶 Mg_2Si 尺寸减小。随着凝固进一步进行 Bi 原子的偏析富集造成了富 Bi 相化合物的形成[11]（图 2d）。因此削弱了 Bi 的变质效果，导致合金力学性能下降（图3）。

未变质 Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金的共晶 Mg_2Si 形貌较为粗大且易于产生裂纹，这导致其具有较低的断裂应力。然而，变质后的 Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金具有纤维状，点状的共晶 Mg_2Si 结构。根据 Griffith 断裂准则，裂纹扩展的临界应力(σ_c)与内部裂缝长度 (C) 之间的关系反比的关系。变质后的共晶 Mg_2Si 在屈服于最大载荷后不会过早开裂，在后续变形拉伸过程中减小了裂纹的形成和扩展，因此变质后的合金具有更好的力学性能。



(a)0　　(b)0.3

图 4 不同 Bi 含量的 Al-5Mg-2Si-0.6Mn 合金的断口像

Fig.4 Fracture images of Al-5Mg-2Si-0.6Mn alloy with different Bi contents

3 结论

（1）元素 Bi 对合金中的共晶 Mg_2Si 具有很强的变质作用。随着 Bi 含量的增加，共晶 Mg_2Si 从变质前的粗纤维状转变成细小的点状纤维。当加入 Bi 量达 0.3 %时，对共晶 Mg_2Si 变质效果最为显著。

（2）Bi 在共晶 Mg_2Si 生长界面前端富集将产生成分过冷，减小了液相的实际过冷度，使共晶 Mg_2Si 的生长速度被限制，使共晶 Mg_2Si 细化。

（3）在合金中加入适量的 Bi 后，合金的力学性能显著提高。与未变质处理的合金相比，合金经 0.3% Bi 变质后的抗拉强度、伸长率分别为 240 MPa 和 5.3%，分别增加了 17.1%和 89.3%。

参考文献：

[1] 刘晓清，李伯龙，李红梅，等. 稀土 Er 对 Al-Mg-Si 合金铸态微观组织的影响[J]. 金属铸锻焊技术，2008，37(7):01-03.

[2] 胡祖麒，万里，吴晗，等. 高强韧压铸 Al-Mg-Si-0.6Mn 合金的微观组织及力学性能[J].中国有色金属学报，2013，23(3):616-622.

[3] 刘政，白光珠，徐丽娜，等. La 对原位自生 Mg_2Si/Al 复合材料组织及性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金，2015，35 (9): 897-901.

[4] 武晓峰，王喆. Nd 对过共晶 Al-18Mg_2Si 合金组织、力学性能及变形行为的影响[J]. 辽宁工业大学学报，2012，32(4):241-246.

[5] Qin Q D, Zhao Y G, Cong P J. Strontium modification and formation of cubic primary Mg_2Si crystals in Mg2Si/Al composite [J]. J Alloy Compd, 2008, 454 (1-2): 142-146.

[6] Hadian R, Emamy M, Varahram N, et al. The effect of Li on the

（下转第 1152 页）

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

间产生极大的拉应力。热疲劳裂纹将首先在V型缺口缺陷(如气孔、收缩、缩松、夹渣和微裂纹等)处萌生。热疲劳裂纹萌生后,随着冷热循环次数的增加,蠕虫状石墨会形成一到二条主裂纹,裂纹沿着基体和石墨继续扩展会萌生大量微裂纹,最终导致材料失效。

3 结论

(1)蠕化剂加入量为0.42%、0.48%和0.54%,蠕化率为90%、70%和55%,石墨形貌由蠕虫状石墨转变为蠕虫状+球状石墨;蠕化率越高,产生裂纹的倾向越大。

(2)循环热应力2 000次,蠕化率90%,萌生明显的主裂纹,裂纹沿着蠕虫状石墨开裂,蠕虫状石墨尖端应力集中明显,为裂纹的扩展提供能量,生成二次裂纹,V型缺口凹陷成崩塌趋势;蠕化率70%和55%,V型缺口球状凹陷变形量大,已吸收大部分能量,导致缺口附近裂纹明显减少,仅在球状石墨尖端部位和基体组织产生少量微小裂纹,且裂纹没有明显扩展,产生裂纹倾向低,V型缺口凹陷未形成崩塌。

(3)蠕化率70%的蠕墨铸铁的抗热疲劳性能最好,蠕化率55%的热疲劳抗性较差,蠕化率90%试样的热疲劳抗性最差。

参考文献:

[1] 李远,杨忠,朱永国,等.静置时间对蠕墨铸铁凝固参数与石墨衰退的影响[J].铸造,2018,67(12):1095-1098.

[2] 陶栋,李建平,杨忠,等.珠光体含量对蠕墨铸铁高温力学性能和热物理性能的影响[J].材料热处理学报,2018,39(06):83-90.

[3] Yue Wu;Jianping Li;Zhong Yang;Yongchun Guo;Zhijun Ma;Minxian Liang;Tong Yang;Dong Tao.Creep behavior accompanying oxidation of compacted graphite cast iron [J].Materials Science and Engineering: A.2018:174-181.

[4] M Moonesan, AH Raouf, F Madah, et al. Effect of alloying elements on thermal shock resistance of gray cast iron[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2012, 520(4) : 226-231.

[5] X Tong, H Zhou, L Ren, et al. Thermal fatigue characteristics of gray cast iron with non-smooth surface treated by laser alloying of Cr powder [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202 (12) : 2527-2534.

[6] A Ktari, N Haddar, A Koster, ML Toure. Numerical computation of thermal fatigue crack growth of cast iron[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2011, 34(7) : 498-509.

[7] 陈丹,吴素珍,吴令宪,等.热疲劳上限温度对球墨铸铁抗热疲劳性能的影响[J].铸造,2017,66(12):1322-1325.

[8] 汤晓华,陈强,张伟明,等.蠕墨铸铁的低周疲劳裂纹扩展速率[J].清华大学学报,2004,44(11):1460-1463.

(上接第1143页)

tensile properties of cast Al-Mg_2Si metal matrix composite [J]. Mater Sci Eng A, 2008, 490 (1-2): 250-257.

[7] Emamy M, Khorshidi R, Honarbakhsh Raouf A. The influence of pure Na on the microstructure and tensile properties of Al-Mg2Si metal matrix composite [J]. Mater Sci Eng A, 2011, 528 (13-14): 4337-4342.

[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]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2011, 21(7): 1455-1464.

[9] 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-20Mg_2Si-2Cu-xBi composite [J]. J Maters Sci Technol, 2016, 32(11): 1083-1097.

[10] X F Wu, Z Wang, G A Zhang, et al. Effect of Bi modification treatment on microstructure, tensile properties, and fracture behavior of cast Al-Mg_2Si metal matrix composite [J]. China Foundry, 2013,1 (10):18-23.

[11] 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. Alloys and Comp, 2018, 767:163-172.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共8章:1、铸铁件均衡凝固与有限补缩;2、铸铁件冒口补缩设计及应用;3、压边浇冒口系统;4、浇注系统大孔出流理论与设计;5、铸件均衡凝固工艺;6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺;7、浇注系统当冒口补缩设计方法;8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页,特快专递邮购价226元。

邮购咨询:李巧凤 029-83222071,技术咨询:13609155628

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