DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.12.006

# 硼对 AlMg5Si2Mn 合金组织与力学性能的影响

毕金亮[1],赵荣达[1],武晓峰[2],王克研[1],伍复发[1]
(1. 辽宁工业大学 材料学院,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**:通过对 AlMg5Si2Mn 合金加入不同含量的 B,研究其对合金组织结构、拉伸性能、硬度的影响。结果表明,加入适量的 B 对 AlMg5Si2Mn 合金中的共晶 $Mg_2Si$ 有较明显的变质作用。加入 0.1%B 时,初生 α-Al 明显细化且部分转变为等轴状;长针状和大片层状的共晶 $Mg_2Si$ 尺寸和片层间距明显减小。抗拉强度从未变质时的 235 MPa 提高到 310 MPa,提高了 32%;当 B 含量达到 0.22%时,共晶 $Mg_2Si$ 全部转变为点状或纤维状,此时伸长率由未变质的 3.9%上升到 9.1%,提高了 130.9%,同时强塑积(PSE)也由未添加 B 时的 925.9 MPa·%增加到 2 684.5 MPa·%。

**关键词**:B;$Mg_2Si$;显微组织;细化;力学性能
**中图分类号**:TG146　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)12-1258-04

# Effect of Boron on Microstructure and Mechanical Properties of AlMg5Si2Mn Alloy

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

**Abstract**: By adding different content of B to AlMg5Si2Mn alloy, the influence on the microstructure, tensile properties and hardness of the alloy was studied. The results show that the eutectic $Mg_2Si$ in AlMg5Si2Mn alloy have obvious metamorphism by adding proper amount of B. When 0.1% B is added, the primary alpha-al is obviously refined and partially transformed into equiaxial shape. The size and spacing of the eutectic $Mg_2Si$ in long needles and large sheets decrease obviously. The tensile strength of 235 MPa is increased to 310 MPa, which is increased by 32%. When the content of B reached 0.22%, eutectic $Mg_2Si$ is all transformed into point or fiber. At this time, elongation increased from 3.9% without modification to 9.1% and 130.9%, and PSE increase from 925.9 MPa·% without B to 2 684.5 MPa·%.

**Key words**: B; $Mg_2Si$; microstructure; refinement; mechanical properties

AlMg5Si2Mn 属于 Al-Mg-Si 合金中的一种,近年来,由于其优良的特性,如低密度、导热性好,热膨胀系数低,比强度高,理想的耐磨和耐腐蚀性能一直备受关注,这些性能使其有望应用于航空航天、汽车等工业领域[1,2]。然而,铸态下的 Al-Mg-Si 合金微观结构中通常有粗糙的初生 α-Al 枝晶和片状共晶 $Mg_2Si$,共晶 $Mg_2Si$ 相互连接,粗大的片状结构以及尖锐的端部为微裂纹的扩展提供了裂纹萌生点和容易的途径[3],这些结构对力学性能,尤其是伸长率有很差的影响。为了提高这类合金的力学性能,人们进行了大量的研究,将共晶 $Mg_2Si$ 转变为细小的、致密的球状并均匀分散在基体中[4-9]。这些研究工作主要分为化学变质[4,8,9]和长时间热处理[5-7]。在铸造铝合金中加入 Sr[4]、P[10]等化学剂可以对共晶 $Mg_2Si$ 相进行变质。针对 α 相,早在 1950 年 Cibula 就发现了 B 对铝和铝合金中的组织均有细化作用[11],此后研究人员在相关方面进行了深入的研究。Li 等发现 B 的加入可有效细化 Al-Si 中的初生 α-Al 相,使其形态更细小,分布更加加紧密[12]。

目前为止,大部分已发表的文献都集中在对过共晶 Al-$Mg_2Si$ 合金中的共晶 $Mg_2Si$ 的变质作用,但 B 对亚共晶 Al-$Mg_2Si$ 合金细化、变质作用的研究还鲜有报道。本文主要研究了 B 对 AlMg5Si2Mn 合金中相组成、显微组织以及力学性能的影响。

## 1　实验

本实验采用的原料为纯度分别 99.3%、99.1%、

收稿日期:2019-09-06
基金项目:国家自然科学基金项目(51971106),辽宁省自然科学基金项目(201602366 和 2019-MS-171)
作者简介:毕金亮(1995-),辽宁朝阳人,硕士研究生.研究方向:高性能铝合金制备.电话:18841628472,E-mail:1751912491@qq.com
通讯作者:伍复发(1980-),江西南康人,教授.研究方向:高性能铝合金制备.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

98.7%的铝锭、镁锭、硅块以及 Al-30Mn 中间合金;硼以化合物 NaBF4 形式加入,加入量分别为 0、1.00%、2.25%、3.50%、5.00%,其中硼元素含量分别为 0、0.10%、0.22%、0.35%、0.50%。熔炼时依次将铝、硅、Al-30%Mn 中间合金放入置于电阻炉的石墨坩埚中进行熔炼,熔炼温度为 780 ℃。待完全熔化后取出坩埚,将镁用压勺完全压入金属液中至熔化,再将坩埚放入电阻炉内保温 10 min 后取出,将氟硼酸钠颗均匀洒在金属液表面(无需搅拌),而后放入炉内,在 740 ℃下保温 5 min 后取出,加入六氯乙烷进行除气除渣,最后浇入 200 ℃预热的金属铸模中,以制备拉伸试样棒。

从各个成分的铸件底部 5~10 mm 处切割下用于显微组织观察的样品,并制备金相制样。最后用氢氟酸(0.5vol%)水溶液侵蚀,利用 X 射线衍射仪(XRD)、光学显微镜(OM)检测相组成和显微组织形貌。利用万能拉伸试验机在室温下以恒定速率(2 mm/min)进行拉伸实验。利用 HR150DT 洛氏硬度计测试硬度,每组试样测量 6 个值并取平均值。

## 2　实验结果与分析

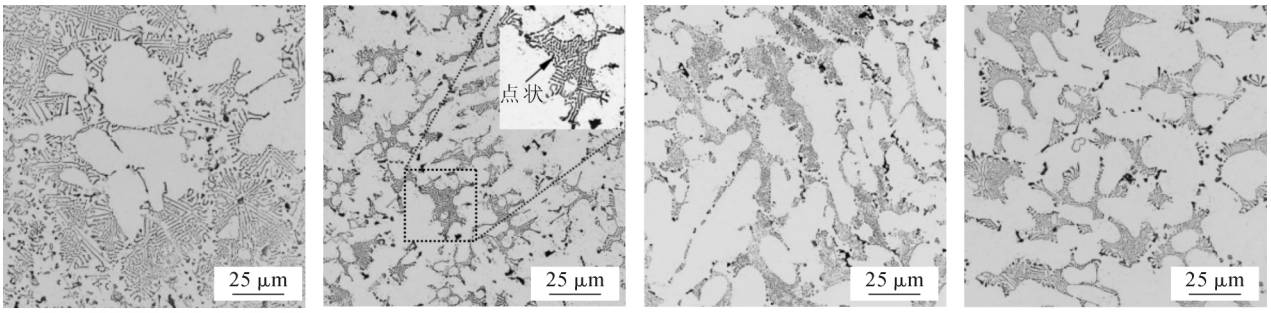
### 2.1　显微组织

图 1 为不同 B 含量的 AlMg5Si2Mn 合金显微组织,灰白色的树枝状状组织为初生 α-Al 基体,分布于基体上的黑色组织为 α-Al+$Mg_2Si$ 二元共晶。其中图 1a 为未添加 B 时的显微组织,可以看到其中 α-Al 呈现出不规则的形状,尺寸较大,共晶组织为粗大片层状或针状。当加入 0.1%B 后初生 α-Al 明显被细化,部分转变为等轴状,平均尺寸由未添加 B 时的 17.7 μm 降低到 11.4 μm(图 1b)。长针状和大片层状的共晶 $Mg_2Si$ 尺寸和片层间距明显减小,晶团内部部分长针状结构变为短棒状、甚至点状。增加 B 含量到 0.22 %后,α-Al 的尺寸再次增大,且长宽比明显增加,图 1(b) 的 1.98 增加到图 1(c)的 3.07。但共晶 $Mg_2Si$ 形貌变化十分明显(图 1c),全部变成细小、致密的点状。当 B 含量增加到 0.35 %、0.50 %后,共晶 $Mg_2Si$ 尺寸急剧粗化,但对 α-Al 仍有细化效果(图 1d)。

图 2 为添加不同含量 B 的 AlMg5Si2Mn 合金的 XRD 检测图谱。可以看到,未添加 B 的 AlMg5Si2Mn 合金由 α-Al 和 $Mg_2Si$ 两相组成。添加 0.1% B 后的合金峰强度有所变化,但依然由初生 α-Al 和 $Mg_2Si$ 两相组成,这与图 1 的显微组织所观察到的情况相同。其中 B(或含 B 化合物)未被检测到,这可能是由于 B 加入量较低。

### 2.2　力学性能

图 3 为不同 B 含量的合金拉伸性能曲线。由图可见,合金抗拉强度和伸长率均随 B 的含量增加呈现先提高再减小的趋势。当 B 的添加量达到 0.1% 时,抗拉强度达到最大值,从未添加 B 时的 235 MPa




(a)ω(B)=0%　(b)ω(B)=0.1%　(c)ω(B)=0.22%　(d)ω(B)=0.35%

图 1　添加不同 B 的 AlMg5Si2Mn 合金显微组织

Fig.1　Microstructure of AlMg5Si2Mn alloy with different B

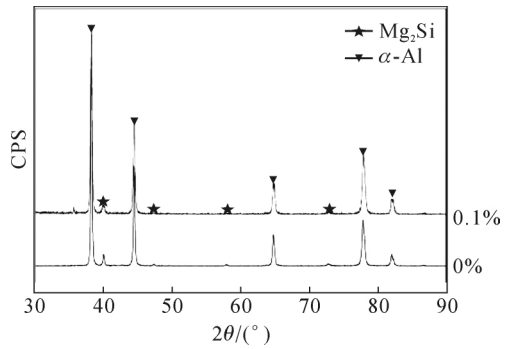



图 2　添加不同含量 B 的 AlMg5Si2Mn 合金 XRD 图谱

Fig.2　XRD patterns of AlMg5Si2Mn alloy with B

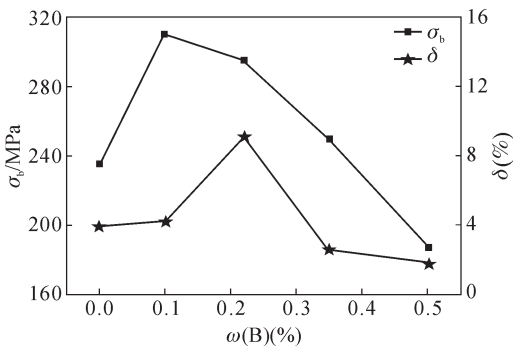



图 3　添加不同含量 B 的 AlMg5Si2Mn 合金拉伸性能

Fig.3　Tensile properties of AlMg5Si2Mn alloy with B

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

提高到 310 MPa，提高了 32%；合金的伸长率从 3.9%提高到 4.2%，在 B 含量为 0.22 %时达到最大的 9.1%，提高了 331%，随后开始降低。

图 4 为不同 B 含量的合金硬度曲线。可以看到，其硬度随着 B 含量的增加，出现先上升后下降的趋势，当 B 的加入量由 0%增加到 0.22%时，硬度由未添加 B 时的 33.2 HRB 增加到 35.8 HRB，提高了 7.8%，随后开始下降。当 B 加入量达到 0.5%时，合金下降到 30.3 HRB。

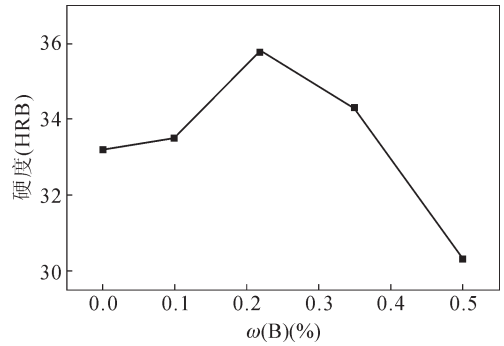



图 4 添加不同含量 B 的 AlMg5Si2Mn 合金硬度
Fig.4 Hardness of AlMg5Si2Mn alloy with B

为了确定出 B 最优添加量，强塑积(PSE)是用来表征材料强韧性的综合性能指标 [13]。通常认为 PSE 是吸收撞击能量能力指标，因此根据 PSE 值，将汽车用钢进行了分组 [14]，由于铝合金在汽车和航空工业中替代低强度钢具有广阔的应用前景，因此重视铝合金 PSE 值并进行优化、同时提高强度和塑性是开发新型高性能铝合金的一个重要参数。本文 PSE 计算结果如图 5 所示，可见当加入 0.22 %的 B 时合金性能得到了十分显著的提高，由未添加 B 时的 925.9 MPa·%增加到 2 684.5 MPa·%。。

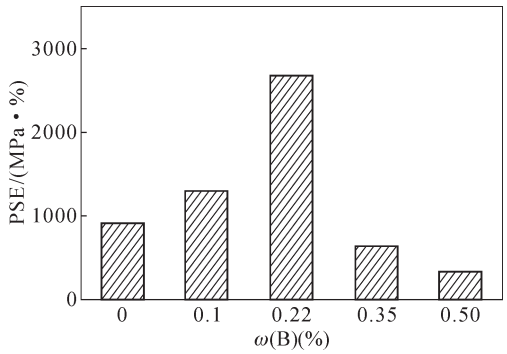



图 5 添加不同含量 B 的 AlMg5Si2Mn 合金 PSE 值
Fig.5 PSE value of AlMg5Si2Mn alloy with B

通过添加 B 降低了初生 α-Al 粒子的平均尺寸(图 1)，因此可以推断 B 抑制其晶粒的生长，且由于硼的原子半径比 Al 小，因此会相应的减小 α 相的晶格常数[15]，从而将长的树枝晶和大块不规则组织变得细小、规则、均匀。根据格雷菲斯的理论，材料的抗拉强度随晶粒尺寸的减小而增大，且与晶粒尺寸的平方根成反比[8]，因此经过组织细化后的合金有较高的抗拉强度；Wang 等通过实验发现，在液相线形成前，硅原子倾向于聚集在 $AlB_2$ 化合物周围。由于 $(111)_{Si}$ 与 $(0001)_{AlB2}$ 的晶格匹配关系，使 $AlB_2$ 化合物成为共晶 Si 的异质核点[16]，从而细化了 Si，由于共晶 Si 与共晶 $Mg_2Si$ 有相似的晶体结构，因此共晶 $Mg_2Si$ 有可能由于 $Al_2B$ 作为异质形核中心使其细化。经 B 变质共晶 $Mg_2Si$ 后，转变为细小致密的点状，这种结构相较于粗大的片状可有避免应力集中、效抑制微裂纹产生，从而使伸长率提高。当 B 含量过多时，材料的抗拉强度和伸长率的下降可能是由于形成了较大的硼化物类化合物[17]，这些化合物又硬又脆，可能会引起裂纹的萌生和扩展。

## 3 结论

(1)加入适量的 B 可有效细化 AlMg5Si2Mn 合金中的共晶 $Mg_2Si$ 相。当 B 含量为 0.1%时，共晶 $Mg_2Si$ 形貌由薄片状变为短纤维状或点状。继续添加 B 到 0.35%时，初生 $Mg_2Si$ 相再次变大，呈现出过变质现象。

(2)B 元素对合金中的共晶 $Mg_2Si$ 有明显的细化作用。当加入 B 量达 0.1%时，抗拉强度从未变质时的 235 MPa 提高到 310 MPa，当加入 B 量达 0.22%时伸长率由未变质的 3.9%上升到 9.1%，硬度由未变质的 33.2 HB 上升到 35.8 HB。

(3)B 的加入抑制初生 α-Al 晶粒的生长，且由于硼的原子半径比 Al 小，因此会相应的减小初生相的晶格常数，从而将长的树枝晶和大块不规则组织变得细小、规则、均匀；由于共晶 $Mg_2Si$ 和共晶 Si 有着相似的晶体结构，所以 $Al_2B$ 可以作为异质形核中心，使其转变为细小致密的点状、纤维状。

**参考文献：**

[1] Zhang J, Fan Z, Wang Y Q, et al. Microstructural refinement in Al-$Mg_2Si$ in-situ composites [J]. Journal of Materials Science Letters, 1999,18:783-4.

[2] Ji S, Watson D, Fan Z, et al. Development of a super ductile diecast Al-Mg-Si alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012,556: 824-833.

[3] Hadian R, Emamy M, Varahram N, et al, The effect of Li on the tensile properties of cast Al-$Mg_2Si$ metal matrix composite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 490: 250-257.

[4] Tebib M, Samuel A M, Ajersch F, et al. Effect of P and Sr additions on the microstructure of hypereutectic Al-15Si-14Mg-4Cu alloy [J]. Materials Characterization.2014,89: 112-123.

（下转第 1269 页）

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

(1-2): 65-80.

[5] Semega B M, Charrin L, Combe A, et al. Evolution of the structure of precipitates during internal oxidation of Ag-0.4 at.% Mg alloy [J]. Philosophical Magazine A, 1992, 66(6): 1139-1148.

[6] Rikel M O, Goldacker W. Kinetics and mechanism of low-temperature internal oxidation of Ag-2 and 4 at.% Mg alloys [J]. Journal of Materials Research, 1999, 14(6):2436-2445.

[7] Jang H, Chan D K, Seidman D N, et al. Atomic scale studies of the mechanisms of internal oxidation[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1993, 29(1): 69-74.

[8] Charrin L, Becquart-Gallissian A, Combe A, et al. Key Experimental Parameters for Internal-Band Formation: Relationship Between Stress and Oxidation Kinetics in Silver-Magnesium Alloys[J]. Oxidation of Metals, 2002, 57(1-2): 81-98.

[9] Charrin L, Combe A, Cabane F, et al. Evidence for the formation of substoichiometric species during internal oxidation of Ag-Mg alloys[J]. Oxidation of Metals, 1993, 40(5-6): 483-501.

[10] **苏明文，郭学茹，沈其峰. 银基合金内氧化研究概述**[J]. **稀有金属合金加工**, 1980(3)：27-34.

[11] Douglass D L, Zhu B, Gesmundo F. Internal-oxide-band formation during oxidation of Ag-Mg alloys [J]. Oxidation of Metals, 1992, 38(5-6): 365-384.

（**上接第** 1260 **页**）

[5] Malekan A, Emamy M, Rassizadehghani J, et al. The effect of solution temperature on the microstructure and tensile properties of Al-15% $Mg_2Si$ composite [J]. Materials & Design, 2011,32 (5): 2701-2709.

[6] Li Z, Li C, Liu Y, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical property of Al-10% $Mg_2Si$ alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 663: 16-19.

[7] Li C, Sun J, Li Z, et al. Microstructure and corrosion behavior of Al-10%Mg2Si cast alloy after heat treatment [J]. Materials Characterization. 2016, 122: 142-147.

[8] Hadian R, Emamy M, Varahram N, et al. The effect of Li on the tensile properties of cast Al-$Mg_2Si$ metal matrix composite [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 490:250-257.

[9] Yu H C, Wang H Y, Chen L, et al. Spheroidization of primary $Mg_2Si$ in Al-20Mg2Si-4.5Cu alloy modified with Ca and Sb during T6 heat treatment process [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 685: 31-38.

[10] Qin Q D, Zhao Y G, Zhou W, et al. Effect of phosphorus on microstructure and growth manner of primary $Mg_2Si$ crystal in $Mg_2Si$/Al composite [J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 447(1-2): 186-191.

[11] Mohanty P S, Gruzleski J E. Grain refinement mechanisms of hypoeutectic Al-Si alloys [J]. Acta Materialia,1996, 44 (9): 3749-3760.

[12] **李小松，蔡安辉，周勇，等**. B **对** Al-7Si **合金** $\alpha$ **相形态和力学性能的影响**[J]. **有色金属(冶炼部分)**, 2011(5):34-37.

[13] Zhou S, Zhang K, Wang Y, et al. Rong, High strength-elongation product of Nb-microalloyed low-carbon steel by a novel quenching-partitioning-tempering process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011,528 (27):8006-8012.

[14] Liu W J. An introduction to advanced hot-formed steel for automobile[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 27 (3): 373-382.

[15] **史志红，文九巴，马景灵，等**. B **含量对** Al -Zn -Sn **系阳极材料组织与性能的影响**[J]. **热加工工艺**, 2010, 39( 2) : 24-26.

[16] Wang L, Bian X F, Yuan S J. Refining effect of boron on eutectic silicon in subeutectic AlSi alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica(English letters), 1999, 12(4): 611-616.

[17] Azarbarmas M, Emamy M, karamouz M, et al. The effects of boron additions on the microstructure, hardness and tensile properties of in situ Al-15% $Mg_2Si$ composite [J]. Materials & Design, 2011, 32 (10): 5049-5054.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书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　　电话/传真：029-83222071　　技术咨询：13609155628

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