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 Mg₂Si 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 Mg₂Si 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 Mg₂Si 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;Mg₂Si;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 Jinliang¹, ZHAO Rongda¹, WU Xiaofeng², WANG Keyan¹, WU Fufa¹

(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 Mg₂Si 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 Mg₂Si 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 Mg₂Si 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; Mg₂Si; 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 Mg₂Si,共晶 Mg₂Si 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

- 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

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^[49]。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-Mg₂Si 合金中的共晶 Mg₂Si 的变质作用,但 B 对亚共晶 Al-Mg₂Si 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

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+Mg₂Si 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 μ m 降低到 11.4 μ m(图 1b)。长针状和大片 层状的共晶 Mg₂Si 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 Mg₂Si 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 Mg₂Si 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 Mg₂Si 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 Mg₂Si 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





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

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。



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·%。。





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 AlB₂ 化合物周围。 由于(111)_{Si} 与(0001)_{AlB2} 的晶格匹配关系,使 AlB₂ 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 Mg₂Si 有相似的晶体结构,因此共 晶 Mg₂Si 有可能由于 Al₂B 作为异质形核中心使其 细化。经 B 变质共晶 Mg₂Si 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 Mg2Si 相。当 B 含量为 0.1%时,共晶 Mg2Si 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 Mg2Si 相再次变大,呈现出过 变质现象。

(2)B元素对合金中的共晶 Mg₂Si 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 Mg₂Si 和共晶 Si 有 着相似的晶体结构,所以 Al₂B 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:

- Zhang J, Fan Z, Wang Y Q, et al. Microstructural refinement in Al-Mg₂Si 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-Mg₂Si 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)

(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 Experimen-

(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% Mg₂Si 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% Mg₂Si 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-Mg₂Si 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 Mg₂Si 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 Mg₂Si crystal in Mg₂Si/Al composite [J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 447(1-2): 186-191.

tal 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.
- [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 α 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% Mg₂Si composite [J]. Materials & Design, 2011, 32 (10): 5049-5054.



《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