

热处理对 Bi 变质 AHS 铝合金组织及力学性能的影响

邹 慧

(吉林铁道职业技术学院 机械工程学院, 吉林省吉林 132200)

摘要: 研究了热处理对Bi变质AHS合金组织及性能的影响。结果表明: AHS合金经Bi变质后, 共晶硅组织形貌发生明显变化, 由未变质时细长杆状、针片状转变成细小的蠕虫状、纤维状和颗粒状。当Bi含量为4%时, 热处理后合金的抗拉强度和伸长率均达到最大值, 分别为318 MPa和3.2%。与热处理后未变质合金的抗拉强度和伸长率相比, 分别提高了38.26%和167%。合金的断裂方式为韧性断裂, Bi变质显著提高了AHS合金的综合力学性能。

关键词: AHS铝合金; Bi变质; 共晶硅形貌; 力学性能

AHS铝合金为日本牌号, 属于Al-Si-Cu-Mg系合金, 其化学成分接近于国产牌号ZL108, 硅含量接近Al-Si合金共晶点, 因此, 又属于近共晶铝硅合金。该合金具有良好的铸造性、气密性高和热裂倾向小, 同时具备质量轻、导热好、耐腐蚀、比强度高诸优点, 广泛应用于汽车发动机中的活塞材料^[1-4]。此外, AHS铝合金不同于ZL108铝合金, 它还是一种变形铝合金, 因此, 具有良好的挤压性能和机械加工性能。由于该合金在铸造生产过程中, 常出现粗大初生 α -Al及片状、块状及长杆状的共晶硅组织, 从而导致合金综合力学性能降低。因此, 需要对合金中的初生 α -Al相进行细化和共晶硅组织形貌进行变质处理。因此, 在铸造过程中, 常常加入变质剂Sb^[1]、P^[1]、Sr^[2, 4-7]、Re^[1, 3]、Y^[7]、Ce^[8]和晶粒细化剂Al-5Ti-B^[1, 4]、Al-Ti^[4]等。本文采用Bi变质剂对AHS合金中的共晶硅进行变质处理, 由于Bi元素具有自润滑性能, 可以改善合金组织的耐磨性, 因此, 本文研究了不同Bi含量对合金组织及性能的影响, 为实际应用提供工艺参数和理论依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

采用工业纯铝(纯度99.7%)、工业纯镁(纯度99.8%)、紫铜(纯度99.6%)、纯锌(纯度99.7%)、Al-5%Ti、Al-20%Si以及Al-10%Mn中间合金, 按照表1所示化学成分熔炼配制AHS合金。精炼除气剂为六氯乙烷(C₂Cl₆)。

1.2 试验方法及过程

首先将已称量好的纯铝块、纯铜、Al-5%Ti、Al-20%Si与Al-10%Mn中间合金, 一起放入井式电阻炉(型号SG2-5-10型, 额定功率为5 kW, 额定温度1 000 ℃,)中的粘土石墨坩埚中, 加热温度为750 ℃, 保温1~2 h。待合金完全熔化后, 将铝箔包

表1 AHS合金名义化学成分
Table 1 Nominal chemical composition of the AHS alloy $w_B/\%$

Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
10~12	3.5~4.0	<0.1	0.45~0.65	<0.1	<0.2	余量

作者简介:

邹慧(1989-), 女, 讲师, 从事汽车商务教学及汽车材料制备等研究工作。
E-mail: zouh1990@sina.com

中图分类号: TG242.1
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2022)02-0171-05

收稿日期:

2021-04-19 收到初稿,
2021-08-15 收到修订稿。

裹的纯镁、纯锌用钟罩压入合金熔体中，保温2 min左右。然后，加入 C_2Cl_6 （添加量为熔体总量的0.5%）进行除气、扒渣，静置2 min左右。接着，将用铝箔包裹的Bi颗粒，用钟罩压入合金熔体中进行变质处理，Bi添加量分别为0%、1%、2%、3%、4%、5%，变质温度为750 ℃，变质时间为30 min。合金液变质处理后，对合金熔体进行第二次精炼除气，方法同上，待合金液除气、扒渣后，浇注到预热温度为250 ℃的金属铸型（尺寸为 $\phi 25\text{ mm} \times 130\text{ mm}$ ）中。然后将所得金属棒距下端10 mm处中心部分，采用线切割设备切割拉伸试样（图1）、金相试样和热处理试样。采用JK-SX2-12-10N型箱式电阻炉进行T6（540 ℃ \times 4 h+200 ℃ \times 4 h）热处理。试样经砂轮、砂纸研磨、抛光后，用0.5% HF水溶液腐蚀，利用PTI金相显微镜进行组织观察，采用10% NaOH溶液对抛磨后的试样表面进行深腐蚀，腐蚀时间5 min。用WAW-300型万能拉伸试验机，以1 mm/min的速度进行拉伸试验。利用JSM-6490LV型扫描电镜（SEM）对深腐蚀试样表面及拉伸断口组织形貌进行观察分析。采用RIGAKUD/max-RaX-ray型衍

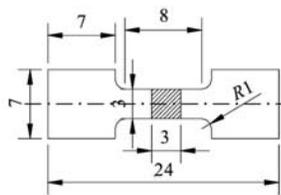


图1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 The dimension of the tensile sample

射仪（12 kW，CuK α 辐射，波长 $\lambda=1.540\ 5\text{ nm}$ ）对合金物相进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 不同状态下 AHS 合金的显微形貌

图2为不同Bi含量变质AHS合金的显微组织图。

从图2可看出，当AHS合金未变质剂（图2a）时，合金中的共晶硅形貌大多呈长杆状或针片状形貌，局部区域出现块状。当Bi含量为1%（图2b）时，共晶硅形貌开始出现明显的变质效果，其细长杆状组织明显变小；当Bi含量为2%~4%（图2c-e）时，合金中的短杆状共晶硅消失，其形貌逐渐转变成细小的蠕虫状、纤维状和颗粒状，且均匀弥散分布在 α -Al合金基体中。此时，合金中的共晶组织出现良好的变质效果。当Bi含量为5%（图2f）时，合金中出现较为粗大的蠕虫状和短杆状、针片状的共晶硅，且共晶相形貌及尺寸明显恶化，开始出现过变质现象。图3为铸态未变质和4%Bi变质的深腐蚀试样SEM分析结果。

从图3a深腐蚀图中可看出，未变质的AHS合金中，共晶硅形貌呈粗大的板片状组织，而经过4%Bi变质处理后（图3b），共晶硅形貌明显呈蠕虫状、珊瑚状和颗粒状，其形貌发生明显改善，共晶硅尺寸约为2~4 μm ，尺寸明显减小。

图4为经4%Bi变质AHS合金的背散射电子模式（BSE）下观察的Al、Si、Bi元素对应的BSE图像。从图中可观察到，Bi元素主要分布于共晶硅组织中（见

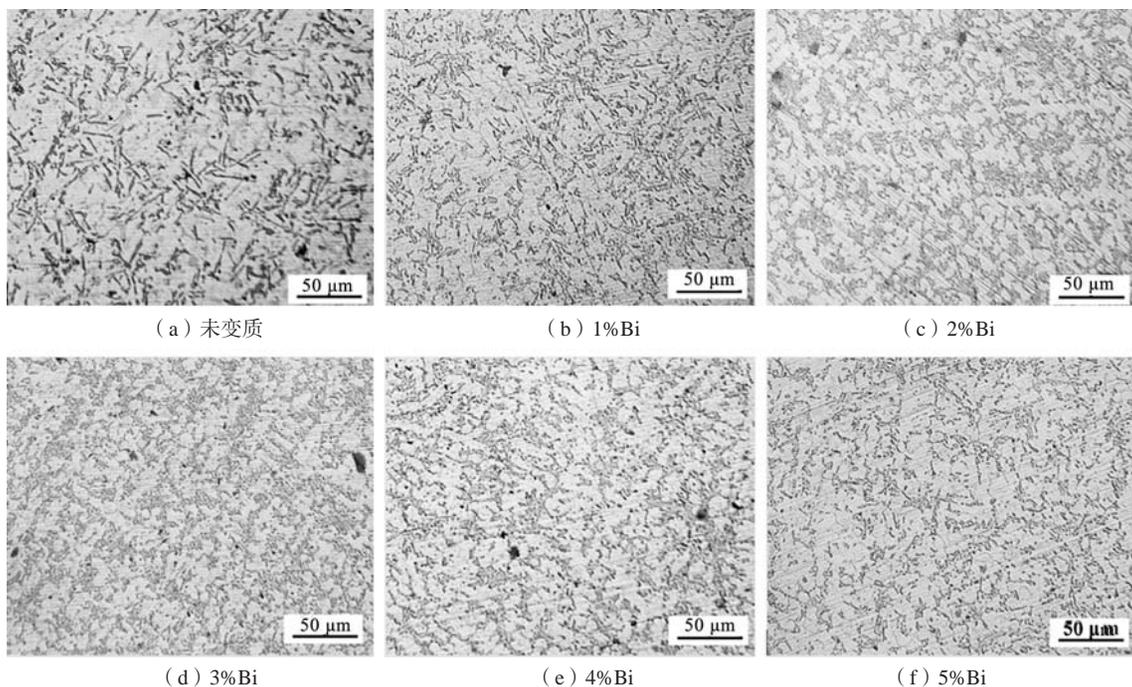


图2 不同Bi含量变质AHS铝合金的凝固组织图

Fig. 2 Solidification microstructures of the AHS aluminum alloys modified with different Bi contents

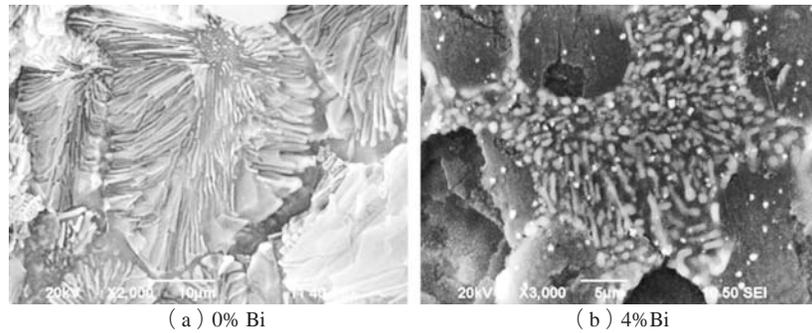


图3 不同Bi含量变质AHS铝合金深腐蚀扫描图

Fig. 3 SEM images of deep corrosion of the modified AHS aluminum alloys with different contents of Bi

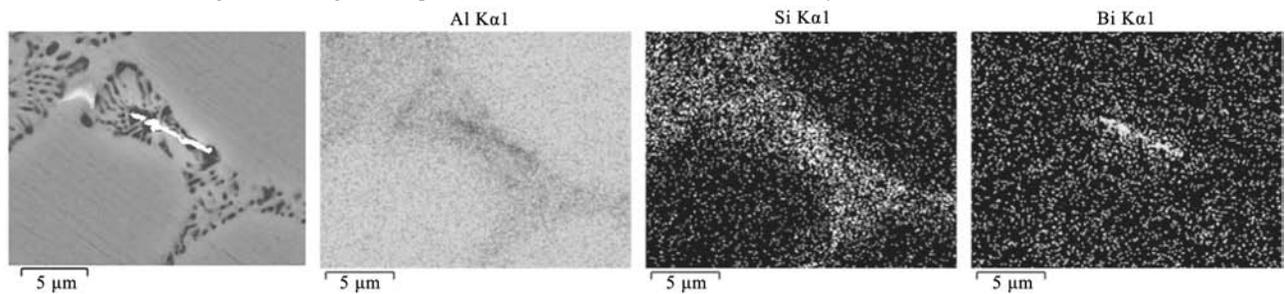


图4 4%Bi变质AHS铝合金的BSE图

Fig. 4 BSE images of the AHS aluminum alloy modified by 4% Bi

图4和图3b中亮白色区域)。通过BSE图像中可发现,其在共晶组织中的含量分布明显高于在合金基体中的含量。

图5所示为不同Bi含量变质AHS合金的XRD谱图。

从XRD图中看出,未变质的AHS合金组织中主要由 α -Al和Si组成,同时含有少量的 Mg_2Si 和 Al_2Cu 相。经过4%Bi变质时,合金中并没有出现Bi的化合物,而出现了单质Bi,由此可知,Bi元素在合金中主要以单质的形式存在。根据相关文献^[8-10]可知,当Bi元素在铝硅合金液凝固开始时,有少量的Bi原子溶解在初生 α -Al中,随着凝固的不断进行,Bi原子不断地被排挤到固-液前沿,并不断地富集在未凝固的合金液中,因此导致剩余的液相中Bi元素的浓度含量越来越高,使固-液界面前沿产生成分过冷,导致共晶硅相尺寸减小。当剩余液相达到共晶转变温度时,发生共晶转变,此时,共晶硅在凝固结晶时,出现大量的孪晶缺陷。由于共晶Si凝固结晶过程存在Bi原子,且Bi是表面活性元素,因此,Bi原子将取代Si原子吸附在孪晶凹坑处,从而阻碍共晶Si沿孪晶方向上长大,进而改变共晶Si的生长形貌^[11]。当Bi元素含量过高时,在合金液凝固过程中,Bi原子在固-液界面前沿产生不断的富集、偏析,产生富Bi相化合物^[12],从而,削弱了Bi元素在合金液中的变质效果。

图6所示为T6(540℃×4h+200℃×4h)热处理下不同Bi含量变质AHS铝合金的显微组织图。

从图6中可观察到,经T6处理后,未变质合金组织中的共晶硅形貌,由原来铸态中的长杆状、针片状转

变成较圆滑的多角形和长圆形,菱角和尖角部分明显钝化。经过1%Bi变质(图6b)时,与未变质相比,共晶硅尺寸明显开始变小,多角形和长圆形组织消失,多数形貌转变为近球形。随着Bi的不断增加(图6c-e),共晶硅形貌显著变化,全部转变成球形颗粒,且弥散均匀地分布在 α -Al合金基体中。当Bi含量达到4%时,共晶硅尺寸最小,平均尺寸为5 μm 左右。当Bi含量达到5%时,共晶硅尺寸开始明显粗大,尺寸为12~15 μm ,但其形貌无明显变化。

2.2 不同状态下 AHS 合金力学性能

不同状态下AHS合金的力学性能变化曲线图见图7。

从图7可知,随着Bi含量的不断增加,热处理前后AHS合金的抗拉强度(图a)及断后伸长率(图b)呈

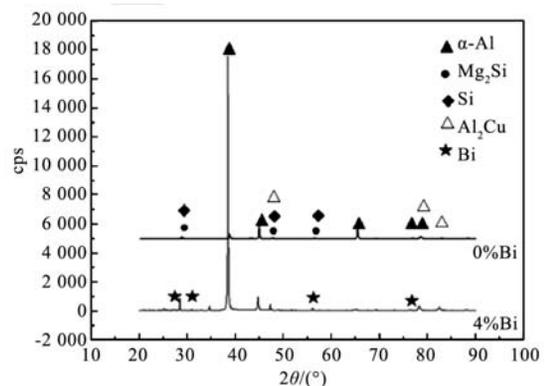


图5 不同Bi含量变质AHS合金的XRD谱图

Fig. 5 XRD patterns of the AHS alloys modified with different Bi contents

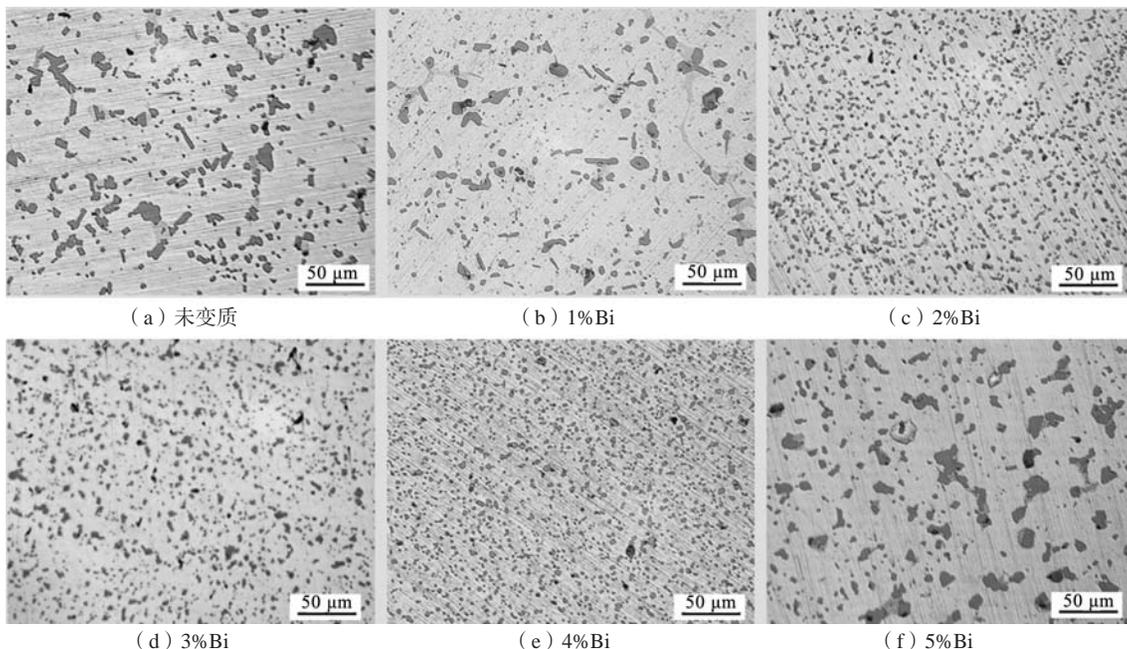


图6 热处理下Bi变质AHS铝合金的显微组织图

Fig. 6 Microstructures of the AHS aluminum alloy modified by Bi after heat treatment

现出先升高而后降低的趋势。当Bi含量为4%时，热处理后合金的抗拉强度和伸长率均达到最大值，分别为318 MPa和3.2%。与热处理后未变质合金的抗拉强度和伸长率相比，分别提高了38.26%和167%。由此可见，Bi变质显著提高了AHS合金的综合力学性能。当Bi含量

达到5%时，合金的抗拉强度及伸长率出现明显下降。

2.3 热处理下 Bi 变质 AHS 合金拉伸断口形貌

热处理下Bi变质AHS合金前后的拉伸断口组织形貌如图8所示。

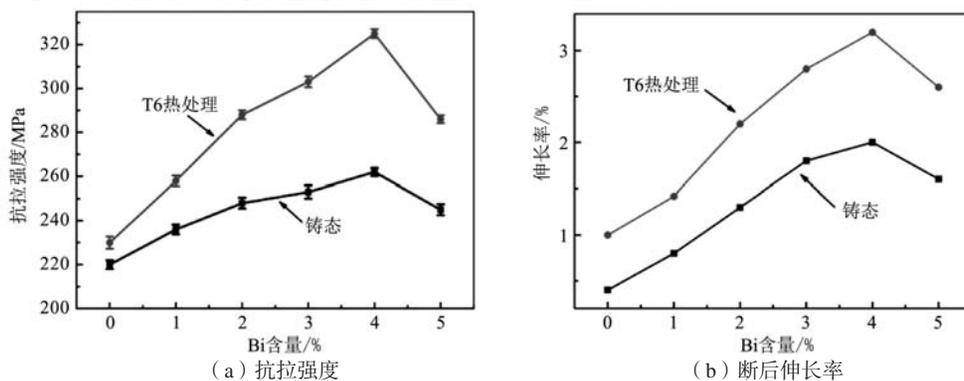
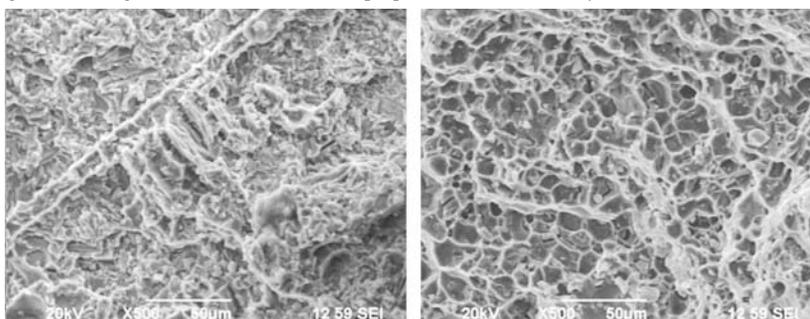


图7 不同状态下AHS合金的力学性能变化曲线图

Fig. 7 The change curves of the mechanical properties of the AHS alloys under different conditions



(a) 未变质 (b) 4%Bi变质

图8 热处理下Bi变质AHS合金前后的断口形貌图

Fig. 8 Fracture morphologies of the AHS alloys modified by Bi after heat treatment

从图8a中可明显看出, 热处理后未变质AHS合金的断口形貌中出现较平滑的解理面, 局部区域出现撕裂脊, 并夹杂着尺寸大小不等的韧窝, 由此可知, 未变质合金的断裂方式为韧-脆混合断裂。而经过4%Bi变质的合金组织中出现大量尺寸不等的韧窝, 较大光滑解理面全部消失。由此可知, 经变质处理后, 合金的断裂方式为韧性断裂, 合金的塑性明显提高。

显变化, 由未变质时细长杆状、针片状转变成细小的蠕虫状、纤维状和颗粒状。

(2) 当Bi含量为4%时, 热处理后合金的抗拉强度和伸长率均达到最大值, 分别为318 MPa和3.2%。与热处理后未变质合金的抗拉强度和伸长率相比, 分别提高了38.26%和167%。合金的断裂方式为韧性断裂, Bi变质显著提高了AHS合金的力学性能。

3 结论

(1) AHS铝合金经Bi变质后, 共晶硅形貌发生明

参考文献:

- [1] 张胜华, 曹圣泉. 变质剂对AHS合金显微组织和性能的影响 [J]. 中南工业大学学报, 2002, 33 (2): 181-184.
- [2] 姜峰, 索忠源, 于东林, 等. Sr变质对AHS-2铝合金组织及性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (21): 87-90.
- [3] 曹圣泉. 活塞用AHS合金无粗晶环挤压棒材的生产工艺研究 [M]. 长沙: 中南大学, 2002.
- [4] 林顺岩, 牟春, 田士, 等. 晶粒细化剂对AHS铝合金 $\Phi 250$ mm圆铸锭组织和性能的影响 [J]. 铝加工, 2016, 233 (6): 31-35.
- [5] 姜峰, 索忠源, 谭洪武, 等. RE、Sr变质对AHS-2铝合金组织及性能的影响 [J]. 吉林化工学院学报, 2017, 34 (1): 44-49.
- [6] 姚巍, 董剑雄, 王云利, 等. 变质工艺对亚共晶Al-Si合金共晶硅细化的影响 [J]. 铸造, 2007, 56 (10): 1107-1109, 1112.
- [7] 陈志强, 贾锦玉, 胡文鑫, 等. Y与Sr协同作用对Al-Mg-Si合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2020, 69 (4): 367-373.
- [8] 刘春海, 李天, 吴大勇, 等. 稀土Ce对Al-7Si-0.7Mg-0.2Fe合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2019, 68 (2): 152-157.
- [9] 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.
- [10] 王克研, 赵荣达, 毕金亮, 等. Bi对Al-5Mg-2Si-0.6Mn合金的组织及力学性能的影响 [J]. 铸造技术, 2019, 40 (11): 1141-1143, 1152.
- [11] WU X F, WANG Z, ZHANG G. A, 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.
- [12] WU X F, WANG Y, WANG K Y, et al. Enhanced mechanical properties of hypoeutectic Al-10Mg₂Si cast alloys by Bi addition [J]. J. Alloys and Comp, 2018, 767: 163-172.

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Bi Modified AHS Aluminum Alloy

ZOU Hui

(College of Mechanical Engineering, Jilin Railway Technology College, Jilin 132200, Jilin, China)

Abstract:

The effect of heat treatment on the microstructure and properties of AHS alloy modified by Bi was studied. The results showed that the morphology of the eutectic silicon of the AHS alloy changed significantly after Bi modification, which transformed from slender rod-shaped and needle like to fine wormlike, fibrous and granular. When the Bi content was 4%, the tensile strength and elongation of the alloy reached the maximum value, which were 318 MPa and 3.2% respectively. Compared with the unmodified alloy after heat treatment, the tensile strength and elongation increased by 38.26% and 167%, respectively. The fracture mode of the AHS alloy was ductile fracture, and the comprehensive mechanical properties of the AHS alloy were significantly improved by the Bi modification.

Key words:

AHS aluminum alloy; Bi modification; eutectic silicon morphology; mechanical properties