

Al-5Ti-1B 对铸造 A356.2 铝合金组织与性能的影响

曾根华¹, 冯俊鹏¹, 马腾飞¹, 王晓红¹, 吴凌剑², 吴凌锋²

(1. 全省空气动力装备智能制造重点实验室, 浙江衢州 324000;

2. 浙江明道热能科技有限公司, 浙江衢州 324000)

摘要: 以A356.2铝合金为研究对象, 采用重力铸造方法研究Al-5Ti-1B对其组织与性能的影响。结果表明, 添加1% Al-5Ti-1B显著细化了A356.2铝合金 α -Al晶粒尺寸。同时细化的 α -Al晶粒为共晶Si提供了更多、更均匀的形核位置, 导致共晶Si的形貌以及分布状态发生变化, 由长条状和长针状转变为短棒状和短针状, 并且分布均匀。对铸件不同位置进行取样分析, 结果表明, 添加1% Al-5Ti-1B提高了A356.2铝合金流动性, 减少了气孔, 提高了铸件的致密性, 最终导致其强塑性协同提升。添加1% Al-5Ti-1B后, 铸件经T6热处理, A356.2合金铸件的平均屈服强度和伸长率分别达到224 MPa和4.5%, 较A356.2合金分别提升了10.1%和35.9%。

关键词: 铝合金; Al-5Ti-1B; 微观组织; 力学性能; 铸造

作者简介:

曾根华(1999-), 男, 硕士生, 研究方向为高性能特种铝合金。电话: 18317963167, E-mail: zghzf1999@126.com

通信作者:

马腾飞, 男, 教授, 硕士生导师。电话: 13616702606, E-mail: matengfei@163.com

中图分类号: TG113;
TG146.2

文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2025)
10-1358-08

收稿日期:

2025-07-15 收到初稿,
2025-08-06 收到修订稿。

随着居民消费能力的提升, 汽车成为家庭中不可或缺的一部分, 能源消耗问题日益凸显。在国家“双碳”政策的不断驱动下, 轻量化技术已成为汽车制造业转型升级的核心路径^[1-5]。相较于传统钢材, 铝合金凭借其密度优势(约为钢的1/3)及优异的综合性能, 逐步成为汽车零部件的优选材料^[6]。其中A356.2铝合金是美国铝业协会标准中的一种铸造铝合金, 属于Al-Si-Mg系合金, 具有良好的流动性, 低的热裂倾向及较小的收缩率等优点, 是应用最广泛、技术最成熟的铸造铝合金之一, 在航空航天、新能源和汽车等领域中占据重要地位^[7]。但是A356.2铝合金在铸态下 α -Al晶粒粗大, 粗大板条状以及长针状形貌的共晶Si恶化了其力学性能, 尤其是抗拉强度与塑性, 导致产品不稳定, 易造成零部件失效^[8]。目前常用于改善铝合金力学性能的方法主要有优化铸造工艺、热处理、调控合金成分与微观组织等。其中调控合金成分与微观组织能够显著细化晶粒, 改善共晶Si形貌, 提高合金的力学性能, 因而得到了广泛应用^[9]。

目前铝合金常用的细化剂有Al-Ti-B、Al-Ti-C以及稀土元素, 其中Al-Ti-B细化剂中含有大量TiB₂粒子, 可作为 α -Al的形核质点促进形核, 细化晶粒^[10-12]。研究表明, 在工业上生产铝合金时, Al-Ti-C细化晶粒的效果不如Al-Ti-B, 而稀土元素能够显著细化铝合金晶粒并且变质共晶Si形貌, 但其价格昂贵, 所以工业上通常使用Al-Ti-B细化晶粒^[13]。李等人研究了Al-Ti-B细化剂对6082铝合金组织的影响, 结果表明, 添加Al-Ti-B细化剂能够显著细化 α -Al晶粒与富铁相尺寸, 减少缺陷的产生^[14]。晁等人研究了不同含量的Al-Ti-B细化剂对7050铝合金组织与性能的影响, 发现Al-5Ti-1B的细化效果最佳, 同时力学性能显著提升^[15]。G.S.Vinod Kumar等人研究了Al-Ti-B和Al-Ti-C细化剂对LM25铝合金组织的影响, 结果发现Al-Ti-B的细化效果更优异^[16]。

Al-Ti-B细化剂的添加量对A356.2铝合金铸件组织与性能至关重要, 通常来说, 细化剂添加量越多, 晶粒细化效果越好, 但当添加量超过某一值后, 细化效果便趋

于稳定,且过量添加会导致成本增加;同时 TiB_2 颗粒聚集,形成夹杂物,并且Ti与Al形成粗大的板条状 $TiAl_3$ 相,导致合金塑性下降,且增加成本。添加量过少将导致细化效果不明显,性能难以满足需求^[17]。郭研究了A356铝合金中最佳的Al-5Ti-1B添加量,结果表明当添加量为0.65%时,A356铝合金的性能提升最明显^[18]。由于本试验是随工业生产进行的,在熔炼过程中Al-5Ti-1B会有损耗,所以,本研究利用传统重力铸造工艺,考察1% Al-5Ti-1B细化剂对A356.2铝合金铸件组织与性能的影响。利用金相显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)对A356.2铝合金铸件不同位置进行取样分析,同时通过万能试验机对A356.2铝合金铸件的力学性能进行测试,以期对铸造高强韧铝合金的应用与开发提供参考。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验所用的原材料为云南铝业股份有限公司生产的A356.2铝合金,其中Si6.5%~7.5%、Mg0.2%~0.4%、Fe \leq 0.2%、Cu \leq 0.2%、Mn \leq 0.1%、Zn \leq 0.2%、Ti \leq 0.2%(质量分数,下同)。

1.2 试验方法

采用重力铸造工艺生产A356.2铝合金零件,首先将预热后的A356.2铝锭放置于坩埚中,升温至750℃,待

合金完全熔化后,充分搅拌并静置,随后通入99.99%的高纯氮气进行除气,去除表面浮渣后静置。在温度700~750℃时加入1% Al-5Ti-1B细化剂丝(AMG公司生产),均匀搅拌并静置,二次通入高纯氮气,搅拌,除气,扒渣,静置。浇注零件前,在铝液温度为730℃时,取一个炉前样,同时浇注螺旋线,最后浇注到预热300~350℃的金属型模具中,压铸成零件。该零件为圆形,直径为300 mm,侧面壁厚为20 mm,底面壁厚为15 mm,总质量为5 kg,并对该零件进行T6热处理。

图1为重力铸造生成零件的浇注过程、零件取样位置、拉伸试样以及浇注螺旋线示意图。采用线切割切取尺寸为5 mm \times 5 mm \times 5 mm的正方体金相试样,试样先通过金刚石砂纸从180#研磨至2 000#,然后用金刚石抛光膏进行抛光处理,并使用酒精进行超声清洗5 min,最后使用0.5%(体积分数)HF溶液腐蚀60 s。采用金相显微镜(OM)与HITACHI SU8010型扫描电子显微镜(SEM)结合EDS能谱观察与分析显微组织。利用维氏硬度计(MVS-1000IMT2)测试合金的显微硬度,对样品抛光表面施加300 g的力,并保持10 s,测量10个以上的点以减少误差,最后结果取平均值。同时采用MTS-370.10拉伸试验机对长 \times 宽 \times 厚尺寸为36 mm \times 2 mm \times 2 mm的试样进行拉伸试验,拉伸应变速率为0.000 1 s⁻¹,相同试样取3个,最终结果取平均值。

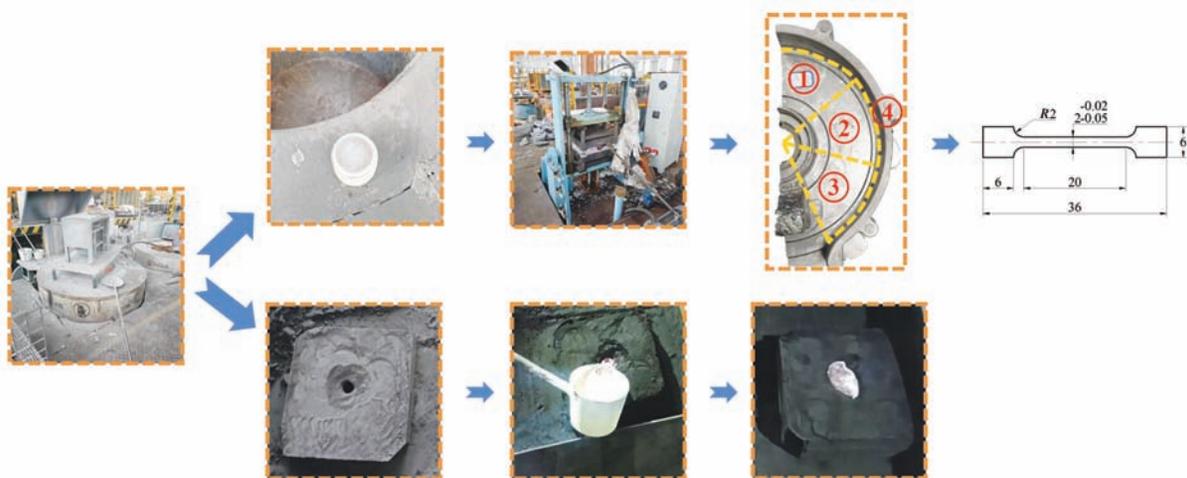


图1 重力铸造、取样位置、拉伸试样以及浇注螺旋线示意图

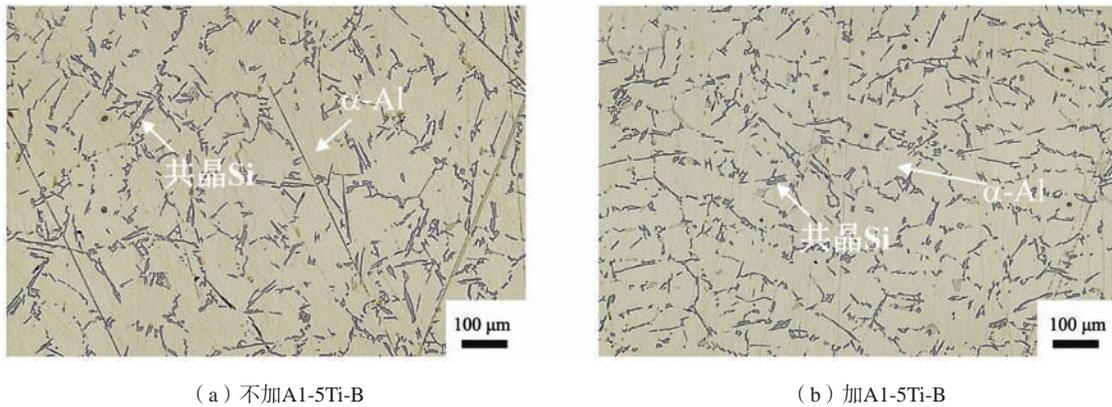
Fig. 1 Schematic diagram of gravity casting, sampling location, tensile specimen, and pouring spiral line

2 结果与分析

2.1 Al-5Ti-1B对A356.2铝合金组织的影响

图2为添加和不添加Al-5Ti-1B细化剂的A356.2铝合金的铸态金相组织。从图中可以观察到,未添加Al-

5Ti-1B时,A356.2铝合金的 α -Al晶粒粗大,达到92.1 μ m,同时共晶Si呈现出粗大的片状以及长针状形貌。添加1% Al-5Ti-1B后,A356.2铝合金的 α -Al晶粒尺寸细化,为79.2 μ m,并且由原来粗大树枝晶转变为



(a) 不加Al-5Ti-B

(b) 加Al-5Ti-B

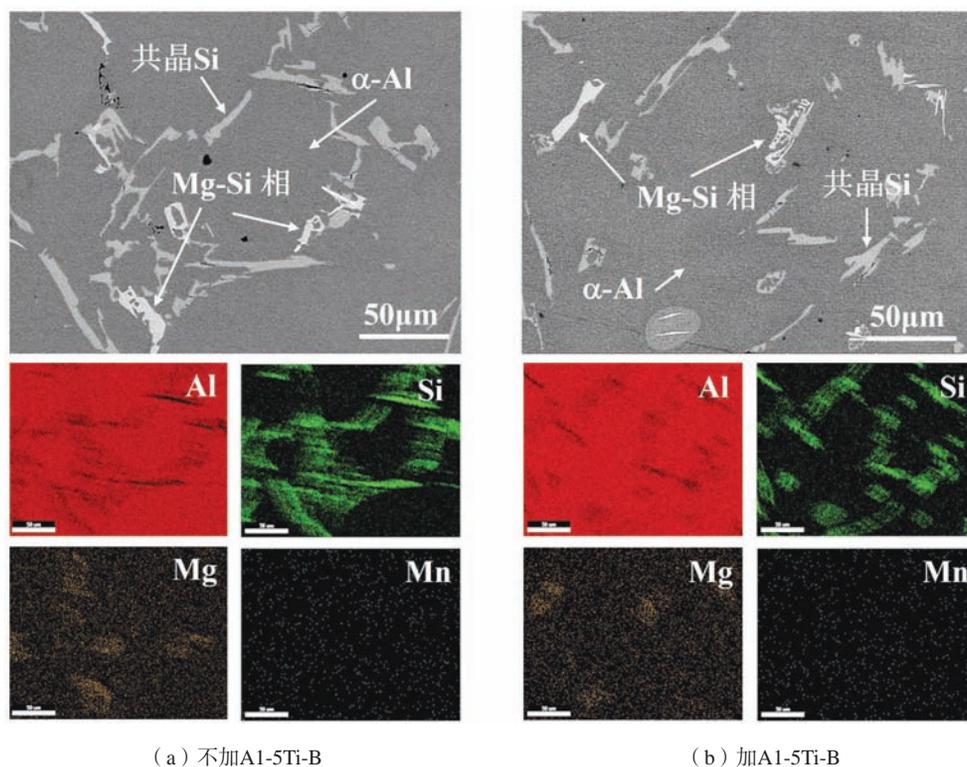
图2 A356.2铝合金的铸态金相组织

Fig. 2 Microstructure of A356.2 aluminum alloy as-cast

等轴晶。同时共晶Si形貌发生明显改变，共晶Si形貌由原来粗大片状以及长针状形貌转变为短棒状以及短针状形貌，同时分布更均匀。Al-5Ti-1B对 α -Al晶粒的细化作用主要归因于TiB₂颗粒是为 α -Al的形核质点，从而促进形核细化晶粒，而共晶Si形貌改善归因于细化的 α -Al晶粒增加了共晶Si的形核位置，导致共晶Si在形核率提高，同时细晶界面对Si相的生长具有钉扎作用，阻碍其粗化^[19]。

为了进一步分析Al-5Ti-1B细化剂对A356.2铝合金铸态组织的影响，采用扫描电镜（SEM）结合能谱

（EDS）对其进一步分析，如图3所示。EDS面扫分析表明该合金主要由Al、Si、Mg元素构成，A356.2铝合金主要由暗灰色基体 α -Al、灰色的共晶Si以及少量白色的析出相构成。白色析出相可确认为Mg-Si相，并且发现Mg-Si尺寸较大。未添加Al-5Ti-1B细化剂，发现共晶Si尺寸较大，并且分布不均匀，而添加1wt% Al-5Ti-1B细化剂后，共晶Si尺寸减小，同时分布均匀，与金相观察结果一致。以上结果表明Al-5Ti-1B细化剂能够有效改善A356.2铝合金的组织。



(a) 不加Al-5Ti-B

(b) 加Al-5Ti-B

图3 A356.2铝合金的铸态SEM组织以及EDS分析

Fig. 3 SEM organization and EDS analysis of A356.2 aluminum alloy before casting

2.2 Al-5Ti-1B 对 A356.2 铝合金流动性的影响

铝液的流动性越好，则螺旋线的长度越长。通过浇注螺旋线评价添加与不添加Al-5Ti-B对A356.2铝合金流动性的影响，如图4所示。从图中可以看出，未添加1% Al-5Ti-1B的A356.2铝合金的螺旋线长度按浇注先后顺序长度分别为125.2 cm、112.5 cm和101.2 cm，而添

加1% Al-5Ti-1B的 A356.2铝合金的螺旋线长度按浇注先后顺序长度分别为130.2 cm、116.5 cm和108.5 cm，通过对比可以发现，添加1% Al-5Ti-1B A356.2铝合金的流动性明显更好，表明适量Al-5Ti-1B的加入可提高A356.2铝合金的流动性。

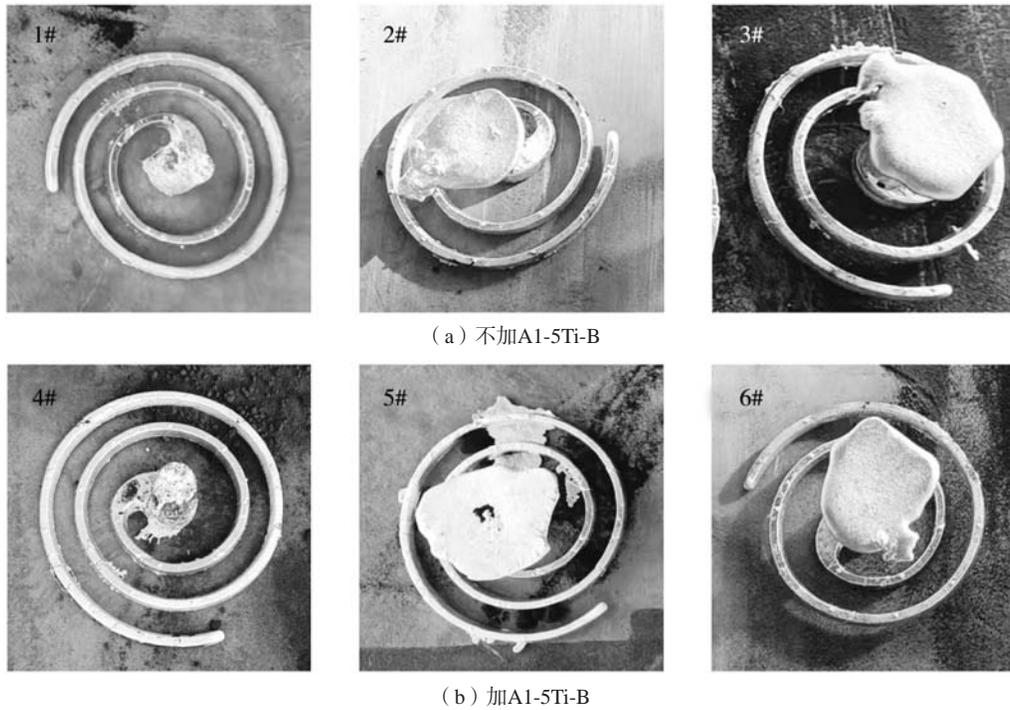


图4 A356.2铝合金流动性检测

Fig. 4 Schematic of A356.2 aluminum alloy flowability test

2.3 铸件不同位置组织分析

添加与不添加Al-5Ti-1B的铝液随工业生产线进行

铸造，对该铸件不同位置进行取样分析，如图1所示。图5为添加与不添加Al-5Ti-1B细化剂铸件不同位置的

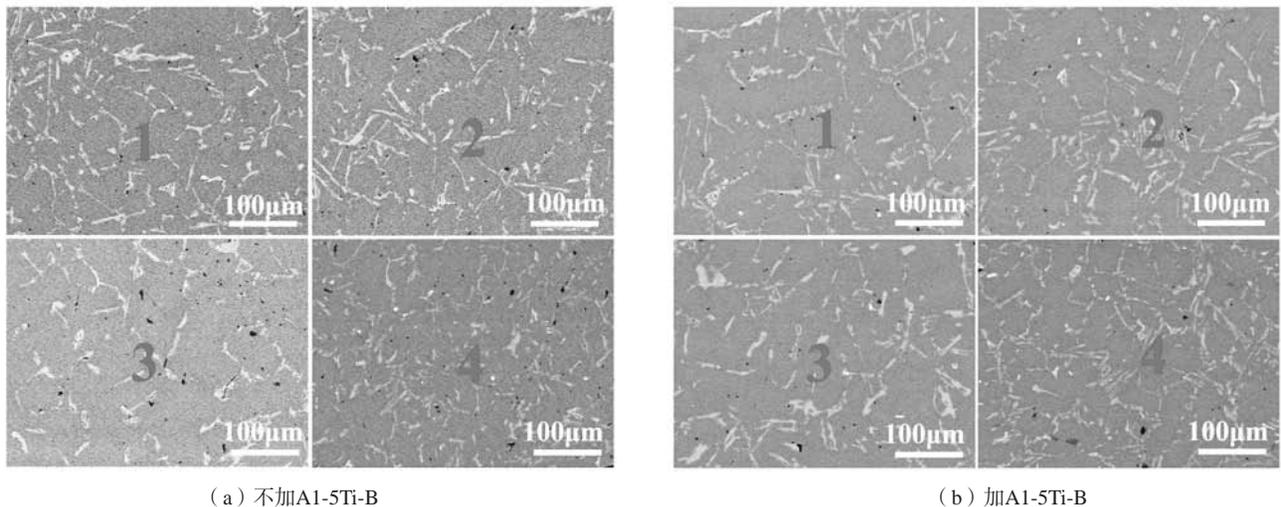


图5 铸件不同位置SEM图像

Fig. 5 SEM images of different locations of typical casting

SEM图像。表1为不添加与添加1% Al-5Ti-1B细化剂铸件不同位置的晶粒统计图。从图中可以看出,该铸件组织主要由暗灰色的基体 α -Al、灰色的共晶Si以及少量白色的Mg₂Si相构成。未添加Al-5Ti-1B时,位置1远离浇口,属于最先凝固的位置,冷却速度较快,凝固时卷入空气较少,所以组织致密,孔洞较少。位置2处于铸件中心部位,冷却速度变慢,晶粒略有长大,共晶Si尺寸也较1位置大。位置3靠近浇注口,铝液温度最高, α -Al晶粒粗大,并且凝固时易卷入空气,所以孔洞较多。位置4处于薄壁位置,铝液冷却最快,所以 α -Al晶粒尺寸相对较小,共晶Si分布也更为均匀。添

加1% Al-5Ti-1B后,位置1的 α -Al晶粒变化不明显,位置2和3的 α -Al晶粒尺寸明显细化,添加1% Al-5Ti-1B相对于不添加的分别细化了14.5%和14.6%,位置4的 α -Al晶粒尺寸略粗。表明冷却速率对Al-5Ti-1B细化效果有重要影响,Al-5Ti-1B在冷却速度较慢的情况下细化效果明显,主要是因为更多的形核位置能够充分形核,而较慢冷却速率下,冷却速率对形核的影响更大^[20]。同时发现,添加Al-5Ti-1B后,铸件的气孔有所减少,特别是在冷却速率较慢的条件下,归因于晶粒的细化,以及Al-5Ti-1B提高了铝液的流动性,促进充型,较少卷入空气,获得致密组织。

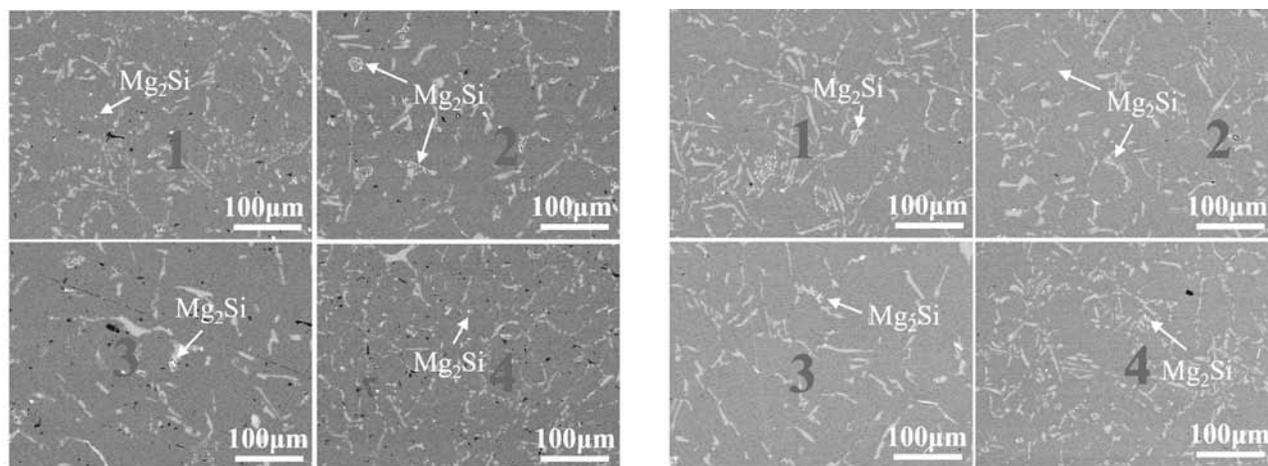
表1 铸件各位置晶粒尺寸大小
Tab. 1 Grain size at different positions of the casting

合金	位置1/ μm	位置2/ μm	位置3/ μm	位置4/ μm
0Al-5Ti-1B	68.5	79.2	88.7	56.4
1%Al-5Ti-1B	70.8	67.7	75.7	57.8

2.3 热处理后铸件不同位置组织分析

图6为经T6热处理后添加与不添加Al-5Ti-1B细化剂铸件不同位置的SEM图像。从图中可以看出,T6热处理后,白色析出相Mg₂Si明显增多且尺寸明显减小,这是因为热处理后,固溶在基体中的Mg和Si以Mg₂Si析出

相大量析出。同时 α -Al晶粒尺寸减小,共晶Si形貌由片状及针状形貌转变为圆点状和短棒状,且分布较均匀。未添加Al-5Ti-1B,可以观察到各位置组织中孔洞较多,而在添加Al-5Ti-1B后,各位置孔洞明显减少,组织更为致密。



(a) 不加Al-5Ti-B

(b) 加Al-5Ti-B

图6 经T6热处理后铸件不同位置SEM图像

Fig. 6 SEM images of different locations of typical casting after T6 heat-treated

2.4 铸件不同位置力学性能分析

分别对T6热处理前后铸件不同位置进行显微硬度分析,结果如图7(a)和(d)所示。热处理前,添加与不添加Al-5Ti-1B的铸件硬度都在HV 65左右,各位置

相差不大,其中位置3硬度相对更高。经T6热处理后,铸件各位置硬度显著提高,达到HV 110左右。未添加Al-5Ti-1B的铸件中,铸件各位置硬度起伏较大,这是由于该铸件较大,铸件冷却条件不一致,最终凝固组

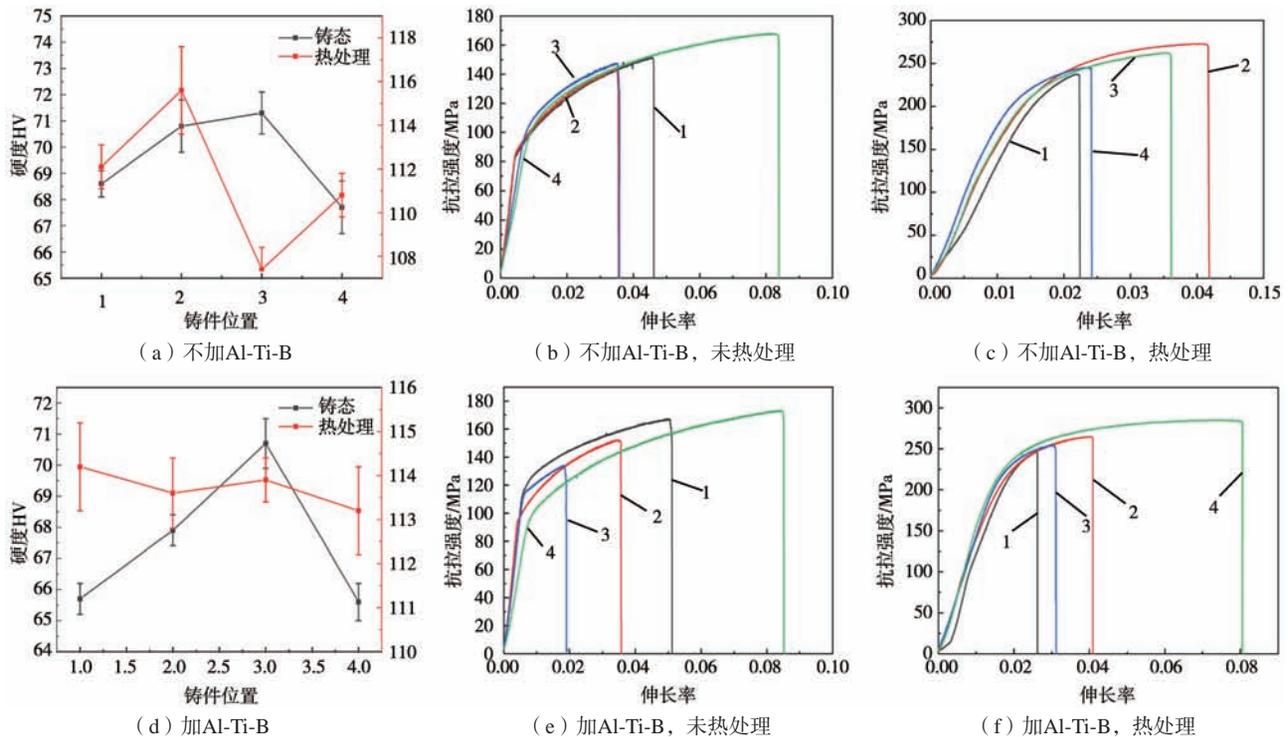


图7 热处理前后铸件不同位置硬度以及拉伸应力-应变曲线

Fig. 7 Hardness and tensile stress-strain curves of different positions at the casting before and after T6 treatment

织存在差异,导致硬度相差较大。添加Al-5Ti-1B后,可以发现铸件各位置硬度相差不大,这归因于铝液流动性提高,使得在浇注过程中,铝液快速填充模具各位置,各位置的铝液温度相差不大,凝固时组织差异较小,所以硬度相差不大。

对铸件各个位置进行拉伸性能测试, T6热处理前后铸件各个位置的拉伸曲线如图7(b)、(c)、(e)和(f)所示。热处理前,对比添加与不添加Al-5Ti-1B铸件各个位置的拉伸性能,发现添加1% Al-5Ti-1B后铸件的屈服强度和抗拉强度整体提升了10 MPa左右,同时位置4的抗拉强度和伸长率最优异,抗拉强度为171.2 MPa,伸长率为8.5%,位置1的屈服强度最优异,强度为120.3 MPa。不添加Al-5Ti-1B铸件的屈服强度整体低于100 MPa,这是因为共晶Si尺寸较大,且为针片状,割裂基体,导致性能不佳。热处理后,铸件的抗拉强度与屈服强度显著提升,而且添加与不添加Al-5Ti-1B铸件的性能差异愈发明显。不添加Al-5Ti-1B,铸件伸长率相对于热处理前整体下降,而添加Al-5Ti-1B后,铸件在抗拉强度明显提升的同时伸长率并没有下降,并且铸件的屈服强度在220 MPa左右,高于不添加Al-5Ti-1B的200 MPa。

为了进一步分析断裂机制,对热处理前后添加和

未添加Al-5Ti-1B铸件位置4的拉伸断口进行分析,如图8所示。从图中可以看出,在未添加Al-5Ti-1B时,断口上分布大量解理面及少量韧窝,属于脆性断裂。热处理后,断口解理面减小,导致强度提升。而添加Al-5Ti-1B后,铸件断裂解理面明显减小,且韧窝增多,属于韧脆结合的断裂方式,表现出平衡的强塑性。因此,添加Al-5Ti-1B细化剂后A356.2铝合金强塑性提升,且有效减少的性能波动。

3 结论

(1) 添加1% Al-5Ti-1B细化剂有效细化了A356.2铝合金的晶粒,同时改善了共晶Si的形貌以及分布状态,其由粗的长条状、长针状转变为断的棒状、短针状,并且分布均匀。

(2) 添加1% Al-5Ti-1B细化剂提高了铸件的流动性,有效减少了孔洞,提高了组织的致密度。

(3) 添加1% Al-5Ti-1B有效提高了铸件的力学性能,经T6热处理后,抗拉强度与屈服强度提高了20 MPa左右,且塑性没有损失,同时减少了铸件力学性能的波动。

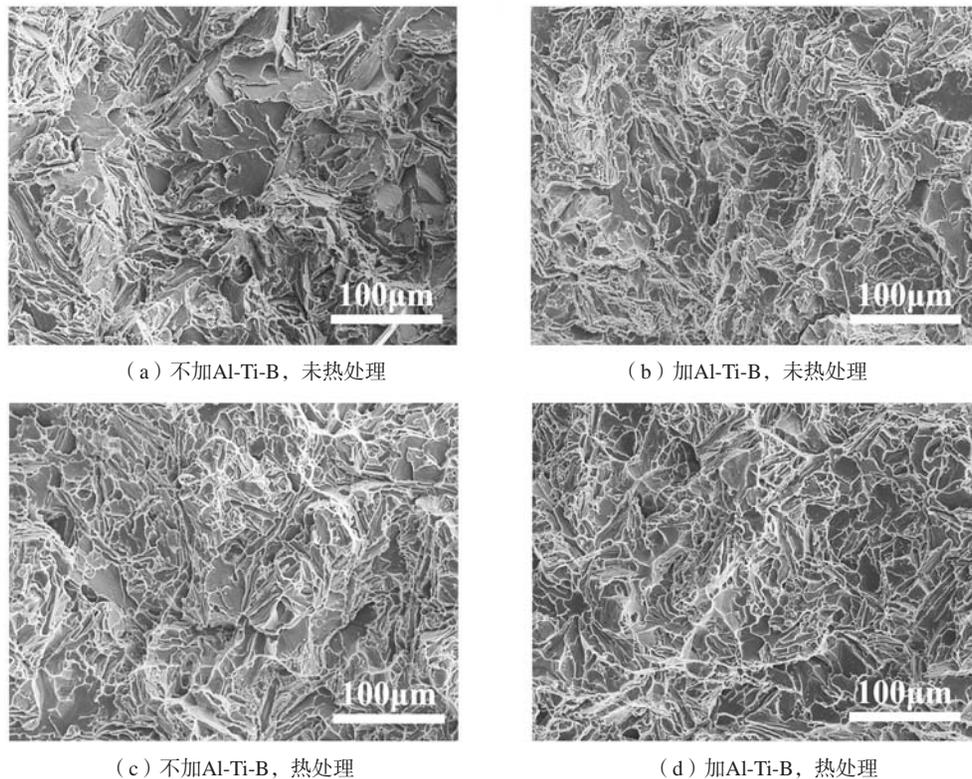


图8 热处理前后铸件位置4拉伸断面SEM图像

Fig. 8 SEM images of tensile fracture surfaces at position 4 of the castings before and after heat treatment

参考文献:

- [1] 黄晓锋, 冯凯, 谢锐. Mg及Mn元素对Al-Si合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2012 (8): 2196-2204.
- [2] BIROL Y. A novel Al-Ti-B alloy for grain refining Al-Si foundry alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 486: 219-222.
- [3] KIM J H, CHOI J W, CHOI J P, et al. A study on the variation of solidification contraction of A356 aluminum alloy with Sr addition [J]. Journal of Materials Science Letters, 2000, 19: 1395-1398.
- [4] 孙自鹏, 张欢欢, 罗德维. 浅谈Al-Ti-C与Al-Ti-B细化剂对7050合金铸锭的影响 [J]. 铝加工, 2023 (2): 25-30.
- [5] ZHAO Y, HE W, SONG D, et al. Effect of ultrasonic melt processing and Al-Ti-B on the microstructural refinement of recycled Al alloys [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 89: 106139.
- [6] 何兵, 覃铭, 兰旅. 热处理对A356铝合金组织与性能的影响 [J]. 长春工业大学学报, 2015, 36 (6): 617-625.
- [7] 查敏, 顾焘, 马品奎, 等. 轻合金大型一体化结构部件压铸成形技术研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (8): 1009-1022.
- [8] 吴恺威, 雍学超. La和Al-5Ti-1B对A356铸造铝合金组织和性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (9): 1271-1276.
- [9] 范晓明, 马琳霞, 卢晓斌, 等. Er和Zn对压铸Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg合金组织和性能影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (3): 403-407.
- [10] 闫洪, 李和平, 曹瑞珂. Sc和AlTiB在A356.2铝合金中的作用对比研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (11): 1286-1289.
- [11] TANG P, LU J S, YANG Y X, et al. Effect of various Er/Al-Ti-C ratios on microstructure and tensile properties of the As-cast Al-10Si-0.8Fe alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds 2023, 968: 172237.
- [12] LIAO H C, LU L Z, LI G J, et al. Influence of minor addition of La and Ce on the ageing precipitation behavior of Sr-modified Al-7Si-0.6Mg alloy [J]. Materials Today Communications 2024, 39: 108825.
- [13] 黄俊辉, 孙明, 张燕艳, 等. Al-Ti-B在Al-Si合金中的晶粒细化行为的研究进展 [J]. 有色金属材料与工程, 2022, 43 (5): 47-60.
- [14] 李一峰, 于承斌, 刘方镇, 等. 晶粒细化工艺对6082铝合金中含铁相的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2021, 49 (4): 19-24.
- [15] 晁代义, 黄同斌, 赫微, 等. Al-Ti-B细化剂对半连续铸造7050铝合金组织及性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (11): 1256-1259.

- [16] KUMAR G S V, MURTY B S, CHAKRABORTY M. Grain refinement response of LM25 alloy towards Al-Ti-C and Al-Ti-B grain refiners [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 472: 112-120.
- [17] 黄俊辉, 孙明, 张燕艳, 等. Al-Ti-B在Al-Si合金中的晶粒细化行为的研究进展 [J]. *有色金属材料与工程*, 2022, 43 (5): 47-60.
- [18] 郭有军. A356铝合金最佳Al-Ti-B用量 [J]. *轻金属*, 2008 (12): 64-66.
- [19] 刘新华, 朱洪军, 陈明岚, 等. TiB_2 对AlSi10MnMg合金压铸态组织及力学性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44 (1): 46-50.
- [20] 刘靓, 李凯良, 刘亚, 等. Al-5Ti-B对过共晶Al-18Si合金的变质效果 [J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2016, 21 (1): 59-64.

Influence of Al-5Ti-1B on Microstructure and Mechanical Properties of Cast A356.2 Aluminum Alloy

ZENG Gen-hua¹, FENG Jun-peng¹, MA Teng-fei¹, WANG Xiao-hong¹, WU Ling-jian², WU Ling-feng²

(1. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing for Aerodynamic Equipment of Zhejiang Province, Quzhou 324000, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Mingdao Thermal Energy Technology Co., Ltd., Quzhou324000, Zhejiang, China)

Abstract:

This study investigates the effects of Al-5Ti-1B on the microstructure and mechanical properties of A356.2 aluminum alloy produced by traditional casting. The results demonstrate that the addition of 1% Al-5Ti-1B effectively refines the α -Al grain size. Simultaneously, the refined α -Al grains provided more uniform nucleation sites for eutectic Si, transforming its morphology from coarse elongated flake-like and needle-like to finer rod-like and short needle-like structures with homogeneous distribution. The fluidity improved after addition of 1% Al-5Ti-1B, reducing the porosity and improving the casting density of the samples extracted from different locations of the components. These improvements ultimately increased the strength and ductility simultaneously. After T6 heat treatment, the addition of 1% Al-5Ti-1B refined grain modifier to A356.2 alloy castings resulted in an average yield strength of 224 MPa and elongation of 4.5%, representing increases of 10.1% and 35.9%, respectively, compared to the unmodified A356.2 alloy.

Key words:

aluminium alloy; Al-5Ti-1B; microstructure; mechanical properties; cast