DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5049

Al–Ti–B 细化剂对铸造 Al–Cu–Mn–Mg 合金晶粒尺寸和热裂倾向性的影响

杨海燕[1],郝启堂[1],张　晗[1],吕亚东[1],余文涛[2]

(1. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室, 陕西 西安 710072;2. 西安文理学院 陕西省表面工程与再制造重点实验室,陕西 西安 710065)

摘　要:Al-Cu-Mn-Mg 合金因其优异的综合性能,被广泛应用于航空航天和轨道交通等领域。然而,该合金在铸造过程中容易出现热裂缺陷,严重影响铸件的质量和可靠性。因此,提高合金的晶粒细化效果,对于改善合金的铸造性能具有重要意义。Al-Ti-B 细化剂是铝合金铸造中最常用的晶粒细化剂,但不同 Ti/B 质量比的 Al-Ti-B 细化剂对晶粒细化效果及热裂机制尚未系统研究。采用 X 射线衍射仪(XRD)、光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)和 CRC(constrained rod cast)金属型约束热裂棒模具等,分析了不同 Ti/B 质量比的 Al-Ti-B 细化剂对铸造 Al-Cu-Mn-Mg 合金微观组织和热裂倾向性的影响。实验结果表明,4 种 Ti/B 比的 Al-Ti-B 细化剂中 Al_3Ti 和 TiB_2 相的含量存在显著差异。在 B 含量均为 0.3%(质量分数)的条件下,添加 Al-3Ti-1B、Al-4Ti-1B、Al-5Ti-1B 和 Al-5Ti-2B 的 Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg 合金的平均晶粒尺寸分别为 162.07、113.73、107.81 和 88.00 μm,对应的热裂纹倾向性指数依次为 112、136、96 和 24。微观机制分析表明,TiB_2 相的含量对晶粒细化效果和热裂倾向性具有显著影响。特别是 Al-5Ti-2B 细化剂,在晶粒细化的同时,显著降低了合金的热裂倾向性,展现出优异的性能。

关键词:Al-Ti-B 细化剂;Al-Cu-Mn-Mg 合金;晶粒尺寸;微观组织;热裂倾向性

中图分类号:TG146.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)07-0655-10

Effect of Al–Ti–B Refiner on the Grain Size and Hot Tear Susceptibility of Cast Al–Cu–Mn–Mg Alloy

YANG Haiyan[1], HAO Qitang[1], ZHANG Han[1], LYU Yadong[1], YU Wentao[2]

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Surface Engineer and Remanufacturing, Xi'an University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Al-Cu-Mn-Mg alloys are widely used in aerospace, rail transportation, and other fields because of their excellent comprehensive properties. However, this alloy is prone to hot cracking defects during the casting process, which severely affects the quality and reliability of castings. Therefore, improving the grain refinement effect of an alloy is highly important for enhancing its casting performance. The Al-Ti-B refiner is the most commonly used grain refiner in aluminium alloy casting, but the effects of Al-Ti-B refiners with different Ti-B mass ratios on grain refinement and hot cracking mechanisms have not yet been systematically studied. The influence of Al-Ti-B refiners with different Ti/B mass ratios on the microstructure and hot cracking susceptibility (HCS) of cast Al-Cu-Mn-Mg alloys was investigated via X-ray diffraction (XRD), optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), and constrained rod casting (CRC) metal molds restrained by hot cracking rod molds. The experimental results reveal that the contents of the Al_3Ti and TiB_2 phases in the four Al-Ti-B refiners (Al-3Ti-1B, Al-4Ti-1B, Al-5Ti-1B, and Al-5Ti-2B) significantly differ. At a constant B content of 0.3 wt.%, the average grain sizes of the Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg alloy refined by these four refiners are 162.07, 113.73, 107.81 and 88.00 μm, respectively. The corresponding HRC indices are 112, 136, 96 and 24. Microstructural mechanism

收稿日期: 2025-03-27

基金项目: 工业和信息化部项目(2023ZY01010);陕西省自然科学基础研究计划(2024JC-YBMS-398)

作者简介: 杨海燕,2000 年生,硕士生. 研究方向为金属材料. Email: yanghaiyan@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 郝启堂,1965 年生,博士,教授. 研究方向为铸造生产及其自动化. Email: haoqitang@nwpu.edu.cn

引用格式: 杨海燕,郝启堂,张晗,吕亚东,余文涛. Al-Ti-B 细化剂对铸造 Al-Cu-Mn-Mg 合金晶粒尺寸和热裂倾向性的影响[J]. 铸造技术,2025, 46(7): 655-664.

YANG H Y, HAO Q T, ZHANG H, LYU Y D, YU W T. Effect of Al-Ti-B refiner on the grain size and hot tear susceptibility of cast Al-Cu-Mn-Mg alloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(7): 655-664.

中国知网　https://www.cnki.net

analysis reveals that the content of the TiB_2 phase significantly influences both the grain refinement efficiency and hot cracking susceptibility. Notably, the Al-5Ti-2B refiner demonstrates superior performance by simultaneously achieving effective grain refinement and substantially reducing the hot cracking tendency of the alloy.

Key words: Al-Ti-B refiner; Al-Cu-Mn-Mg alloy; grain size; microstructure; hot cracking susceptibility

Al-Cu 系合金凭借其高比强度、优异的切削加工性和耐热性等突出特性，广泛应用于航空航天、轨道交通和武器装备等领域[1-4]。然而，该系合金的凝固温度范围较宽，导致其流动性欠佳，且凝固收缩率较大，进而易引发热裂缺陷，严重制约铸件合格率与服役可靠性，限制了 Al-Cu 系合金的推广[5]。

热裂倾向性与枝晶间液膜连续性直接相关，而晶粒细化通过增加晶界面积、延缓晶间搭桥可有效改善熔体的补缩能力，是抑制热裂缺陷的有效手段。目前，铝合金的晶粒细化处理手段主要分为物理方法[6]和化学方法[7-8]两大类。其中，物理方法包含快速凝固(rapid solidification, RS)、大塑性变形(severe plastic deformation, SPD)和振动搅拌(vibration stirring, VS)等。Maria 等[9]研究了 NbB 在慢速和快速凝固中对 6201 合金枝晶间距和晶粒尺寸的影响，发现 NbB/6201 合金快速凝固时比慢速凝固时的晶粒尺寸小约 7 倍。Li 等[10]采用中温等通道转角挤压工艺 (equal channel angular pressing, ECAP)对 Al-Zn-Mg-Cu 合金进行了晶粒细化，发现 ECAP 提高了位错密度、细化了晶粒和第二相，从而改善了合金的耐蚀性。然而，此类方法受限于外部环境和设备等因素的影响，难以适用于大批量生产场景。化学方法通过引入异质形核粒子来调控凝固过程，具有工艺简单、成本低廉等优势，在 Al-Cu 系合金的晶粒细化中应用尤为广泛。

近年来，铸造 Al-Cu 系合金大多通过引入 Ti、B、Zr 等元素实现晶粒细化，其中以 Al-Ti-B 中间合金作为细化剂的应用最为广泛，通过 Al_3Ti 和 TiB_2 的协同作用实现高效形核[11-12]。Al_3Ti 相为四方 $D0_{22}$ 型晶体结构(a=3.85Å, c=8.58Å)，与 α-Al 有良好的晶格匹配，能够降低形核能[13]。TiB_2(六方 $C32$ 型晶体结构，a=3.03Å, c=3.23Å)作为主要的异质形核相，与 Al_3Ti 相共同促进了 α-Al 的形核[14-15]。Wang 等[16]发现 Al-5Ti-1B 细化剂与亚快速凝固协同可使Al-Mn-Si 合金晶粒尺寸由毫米级粗大树枝晶细化至 73 μm 等轴晶。分析发现高密度 TiB_2 能够促进细小等轴晶的产生。然而，工业生产中常用的 Al-Ti-B 细化剂种类繁多，不同种类的 Al-Ti-B 细化剂，其晶粒细化效果也不同。Voncina 等[17]研究了不同厂商生产的 Al-3Ti-B 和 Al-5Ti-B 细化剂对 AA 6182 变形合金的细化效果，发现不同制备工艺会导致细化剂中 Al_3Ti 相的形貌存在显著差异，影响细化效果。Shen 等[18]研究了不同组织状态的 Al-Ti-B 中间合金对A356 合金细化效果的影响。结果表明，随着 Ti 含量的增加，A356 合金的晶粒度增大，二次枝晶臂间距先减小后增大；Al_3Ti 相尺寸越小，细化效果越好。尽管诸多学者在晶粒细化领域中开展了大量研究工作，但由于合金体系及铸造工艺的差异，相关研究结论尚未完全一致。鉴于此，本文聚焦铸造Al-Cu-Mn-Mg 合金，系统研究不同 Ti/B 比的 Al-Ti-B 细化剂对晶粒尺寸、热裂倾向性的影响，旨在为该类合金的工业生产提供重要的理论指导和技术参考。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

合金基体材料包括 Al-47Cu(99.99%，质量分数，下同)、Al-10Mn(99.99%)、纯 Mg(99.99%)和纯 Al(99.99%)，其具体成分见表 1。细化剂选用工业生产中常用的块状 Al-3Ti-1B、Al-4Ti-1B、Al-5Ti-1B 和 Al-5Ti-2B 中间合金。

表1 Al–Cu–Mn–Mg合金名义成分
Tab.1 Nominal composition of the Al–Cu–Mn–Mg alloy (mass fraction/%)

Cu	Mn	Mg	Al
5	0.7	0.55	Bal.

试验采用箱式电阻炉，在高纯石墨坩埚中进行熔炼。首先，将配好的 Al-47Cu、Al-10Mn 和纯 Al 放入提前预热的石墨坩埚中，并将电阻炉加热至 750 ℃。为减少 Mg 元素的烧蚀，待所加材料完全熔化后，将炉温降至 680 ℃后再加入纯 Mg。待 Mg 完全熔化后，升温至 730 ℃，向熔体中加入 Al-Ti-B 细化剂，充分搅拌后保温 30 min。经精炼、除渣后，待熔体温度降至 710 ℃，浇铸到预热(210 ℃，5 h)的金属模具中，获得试验铸锭。

1.2 实验方法

为探究 Al-Ti-B 细化剂中 Ti、B 元素相对含量对相组成及细化效果的影响，试验中向 Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg 合金熔体中分别加入 4 种不同种类的Al-Ti-B 细化剂，且控制各实验组中 B 含量均为 0.3%。在制备的合金铸锭试棒处取样进行晶粒组织分析。对不同合金成分的试样依次进行打磨、抛光后，使用体积分数比为 H_2O:HNO_3:HCl:HF=95.0:2.5:1.5:1.0 的

中国知网 https://www.cnki.net

Keller 试剂腐蚀 13 s。随后，使用 GX-71 型 OLYMPUS 光学显微镜(OM)观察晶粒形貌，并根据 ASTM E112-96 标准，采用截线法测定晶粒平均尺寸。此外，借助 Bruker D8 Discover X 射线衍射仪(XRD)、TESCAN-MIRA 扫描电镜(SEM)及能谱仪(EDS)对 Al-Ti-B 细化剂的微观组织和物相组成进行观察和分析。

为研究该合金的热裂倾向性，采用 CRC(constrained rod cast)金属型约束热裂棒模具作为评判装置[19](图 1)。该模具腔体由 4 根圆棒构成，其直径为 9.5 mm，间距为 38 mm，长度分别为 46.5、84.5、122.5 和 160.5 mm；约束棒的一端通过长度为 189.5 mm 的直浇道实现刚性约束，另一端连接直径为 20 mm 的球型腔，使其能够自由收缩，进而在热节处产生裂纹。为确保 CRC 金属型约束热裂棒模具在实验中的稳定性，每次实验前需清理型腔、预热(210 ℃，5 h)，均匀刷覆复合涂料(Na_2SiO_3:ZnO:H_2O=8:15:200) 直至金属模具表面无可见裸露区域。按 1.1 的步骤制备出添加 Al-Ti-B 细化剂的 Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg 合金液，以 0.5 kg/s 的低速平稳浇铸，最大限度减少气体卷入。每种合金重复进行 3 次实验，以保证热裂评价结果的可靠性。

此方法主要通过观测热裂纹的开裂程度、热裂纹产生的棒长以及热裂纹的位置，评判合金的热裂倾向性。热裂纹倾向性(hot cracking susceptibility, HCS)指数按式(1)计算[20-21]：

$$HCS=\Sigma(\omega_{crack}\times f_{length}\times f_{location}) \quad (1)$$

式中，ω_{crack} 为开裂程度影响因子；f_{length} 为棒长影响因子；$f_{location}$ 为位置影响因子。表 2 列出了各影响因子的含义。将按照肉眼观察到的热裂纹开裂程度分为半发纹(ω_{crack}=1)、发纹(ω_{crack}=2)、严重裂纹(ω_{crack}=3)和完全断裂或半断裂(ω_{crack}=4)4 类[22-23]。棒越长，凝固收缩越容易受到阻碍，越易产生热裂纹，f_{length} 越小，从长至短依次为 4、8、16、32。由于内应力和金属液补缩不充分，热裂更易出现在约束棒与直浇道连接处($f_{location}$=1)与球型腔连接处($f_{location}$=2)，约束棒中间($f_{location}$=3)。

2　实验结果及讨论

2.1　Al–Ti–B 细化剂的微观组织分析

对 Al-3Ti-1B、Al-4Ti-1B、Al-5Ti-1B 和 Al-5Ti-2B 4 种细化剂分别进行 X 射线衍射(XRD)分析，衍射图谱分析如图 2 所示。结果表明，所有样品的衍射峰特征基本一致，主要物相为 α-Al、Al_3Ti 和 TiB_2，未检测到其他第二相的衍射峰。

为了进一步探讨不同细化剂的微观结构，采用 SEM 结合背散射电子模式(BSE)和 EDS 对 4 种Al-Ti-B 细化剂进行了表征和分析，结果如图 3 所示。由图 3 中可见，Al-Ti-B 细化剂的主要相组成为 Al_3Ti 和 TiB_2。Al-5Ti-1B 中的 Al_3Ti 相呈不规则块状，尺寸从几微米到几十微米不等，随机分布在 α-Al 基体上。Al-4Ti-1B 中的 Al_3Ti 相大多呈尺寸较大的杆状，而 Al-3Ti-1B 中的 Al_3Ti 相形貌与 Al-5Ti-1B 相似。此外，还观察到沿晶界分布的大量尺寸从几百纳米到几微米不等的 TiB_2 颗粒。值得注意的是，在 Al-3Ti-1B 和 Al-4Ti-1B 中，TiB_2 相表现出较大范围的局部聚集，而 Al-5Ti-1B 中 TiB_2 相局部聚集区域较小。相比之下，Al-5Ti-2B 中的 Al_3Ti 相较少，TiB_2

表 2 热裂纹倾向性指数影响因子

Tab.2 Influence factors of the hot cracking sensitivity index

Crack	ω_{crack}	Length/mm	f_{length}	Location	$f_{location}$
Incomplete crack	1	160.5	4	Close to the sprue	1
Complete crack	2	122.5	8	Close to the sphere cavity	2
Severe crack	3	84.5	16	Middle of metal bar	3
Complete fracture	4	46.5	32	-	-

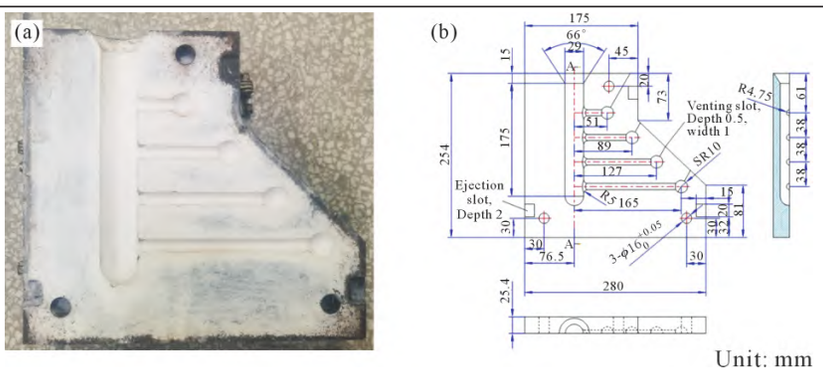


图 1　CRC 金属型约束热裂棒模具：(a) 实物；(b) 尺寸

Fig.1　CRC metal mold restrained hot cracking rod mold: (a) photograph; (b) detailed dimension

中国知网　https://www.cnki.net

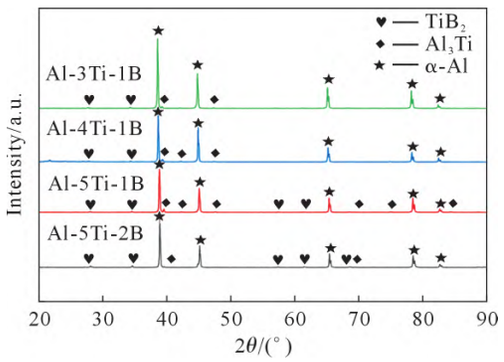


图 2 Al-Ti-B 细化剂 XRD 谱

Fig.2 XRD patterns of the Al-Ti-B refiners

相成为主要第二相，其尺寸与其他 3 种细化剂的 TiB_2 相接近，但局部聚集区域小，且 TiB_2 相在晶粒内部有少量分布。进一步分析表明，4 种细化剂的 Ti/B 质量比不同，Al_3Ti 和 TiB_2 相含量也存在差异。随着 Ti/B 质量比从 5/1→4/1→3/1→2.5/1 的变化，细化剂中 Al_3Ti 相的含量呈现逐渐减少的趋势，TiB_2 相的含量逐渐增多。

2.2 Al–Ti–B 细化剂对 Al–5Cu–0.7Mn–0.55Mg 合金微观组织的影响

图 4 为不同 Ti/B 比 Al-Ti-B 细化剂对 Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg 合金的微观组织与平均晶粒尺寸的影响。为了定量评估合金的晶粒细化效果，采用截线法对铸态合金平均晶粒尺寸进行测定，结果如图 4e~h 所示。可以看出，4 种 Al-Ti-B 细化剂的细化效果存在显著差异，Al-4Ti-1B 的晶粒细化效果较差，微观组织以形状不规则的粗大树枝晶为主，其平均尺寸达 162.07 μm；Al-3Ti-1B 和 Al-5Ti-1B 细化剂的细化效果相似，合金的微观组织中出现了部分等轴晶，平均晶粒尺寸分别细化至 113.73 和107.81 μm，为Al-4Ti-1B 的 70.17%和 66.52%，均优于 Al-4Ti-1B；Al-5Ti-2B 细化剂的细化效果最佳，晶粒尺寸显著减少且分布更加均匀，晶粒形态由粗大的树枝晶转变为细小的等轴晶，平均晶粒尺寸减小至 88.00 μm，仅

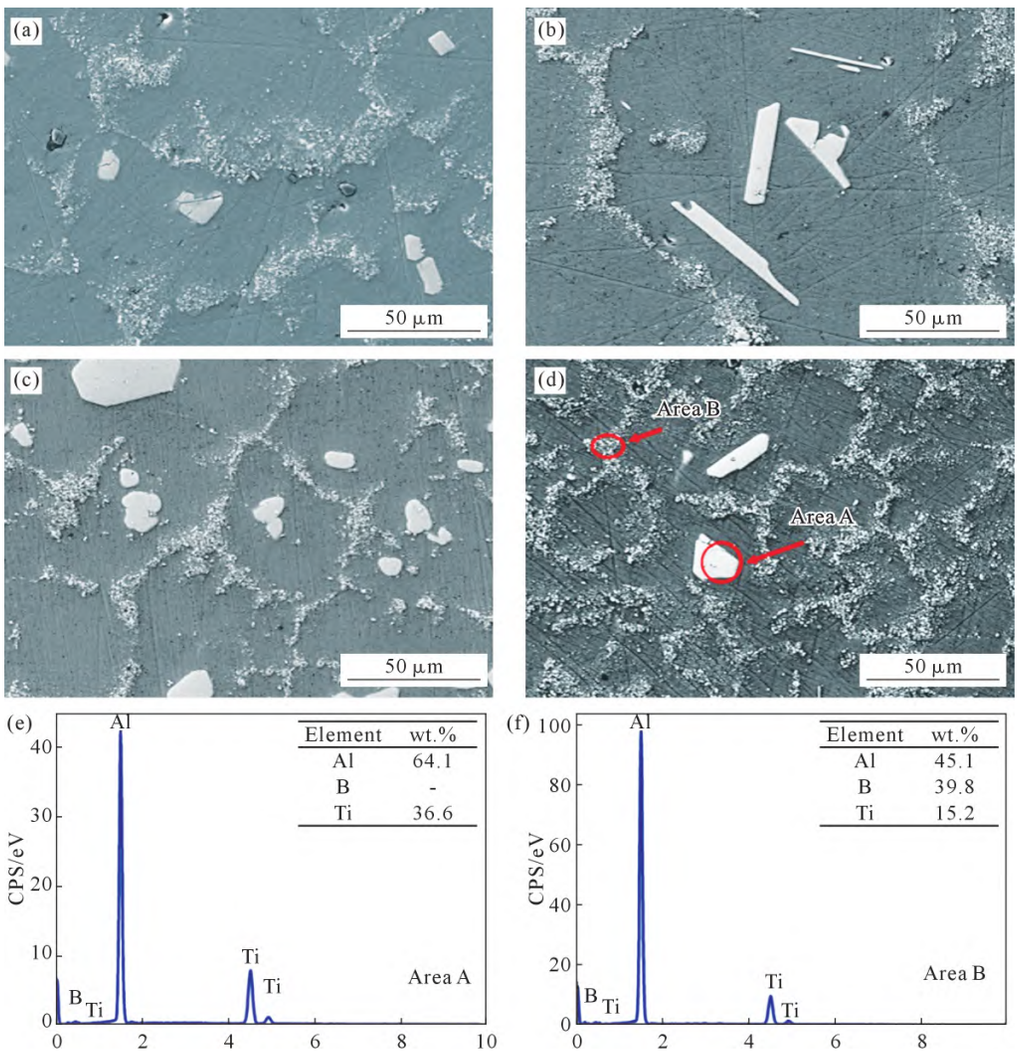


图 3 Al-Ti-B 细化剂微观组织及能谱分析：(a) Al-3Ti-1B；(b) Al-4Ti-1B；(c) Al-5Ti-1B；(d) Al-5Ti-2B；(e) 区域 A 的 EDS 能谱分析；(f) 区域 B 的 EDS 能谱分析

Fig.3 Microstructures and EDS analysis of the Al-Ti-B refiners: (a) Al-3Ti-1B; (b) Al-4Ti-1B; (c) Al-5Ti-1B; (d) Al-5Ti-2B; (e) EDS analysis of area A; (f) EDS analysis of area B

中国知网 https://www.cnki.net

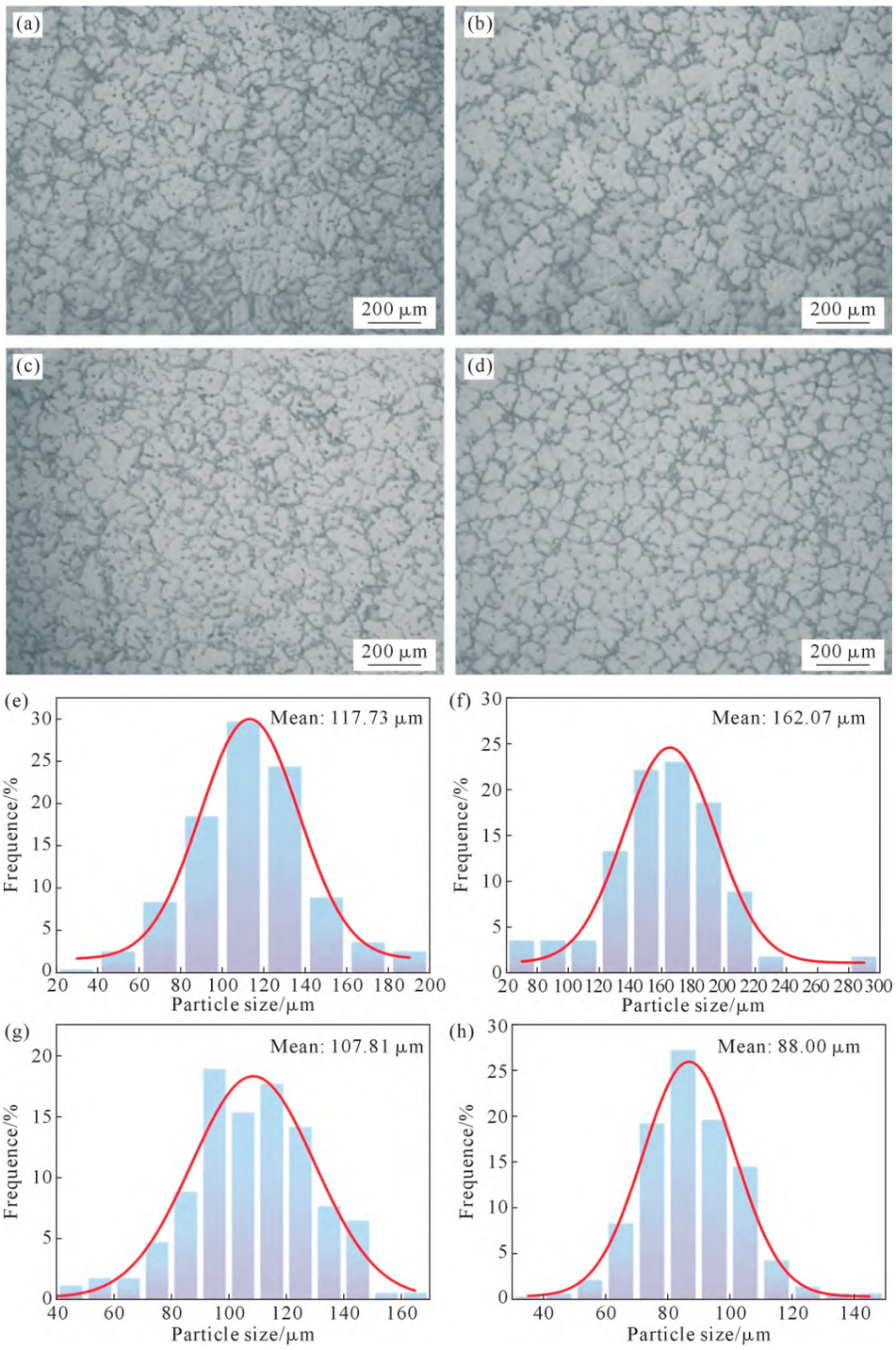


图 4　添加 Al-Ti-B 细化剂的 Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg 合金微观组织与平均晶粒尺寸：(a, e) Al-3Ti-1B; (b, f) Al-4Ti-1B; (c, g) Al-5Ti-1B; (d, h) Al-5Ti-2B

Fig.4　Microstructure and average grain size of the Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg alloy refined using Al-Ti-B refiners: (a, e) Al-3Ti-1B; (b, f) Al-4Ti-1B; (c, g) Al-5Ti-1B; (d, h) Al-5Ti-2B

为 Al-4Ti-1B 细化剂合金平均晶粒尺寸的 54.30%。

Al-Ti-B 细化剂中起细化作用的物相为 Al_3Ti 和 TiB_2。高形核潜能的形核粒子，即表面覆盖有 Al_3Ti 改性层的 TiB_2，配合高生长限制因子的溶质元素 Ti，是 Al-Ti-B 能够有效细化 Al-Cu-Mn-Mg 合金晶粒的关键原因[24]。根据 Al-Ti 二元平衡相图富 Al 端(图 5a)的热力学特征，当熔体温度降至 665 ℃时，液相 Al(L)与 Al_3Ti 发生包晶反应，生成 α-Al 固溶体，即 $Al(L)+Al_3Ti\rightarrow\alpha\text{-}Al$[25]。然而，在亚包晶成分下，$Al_3Ti$ 相在热力学上是不稳定的。在熔体保温过程中，熔体中的 Al_3Ti 相会分解释放出 Ti，随着熔体温度的降低，Ti 会以 α(Ti)相的形式在熔体中沉淀析出[26]。而 Al-Ti-B 中的 TiB_2 分散在熔体中(图 5b)，使得Al-Ti 的包晶点(665 ℃，0.15%Ti 处)降低并向富 Al 角靠近。当熔体温度降至 Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg 合金的凝固温度时，Al_3Ti 和 TiB_2 充当异质形核基底(图

中国知网　https://www.cnki.net

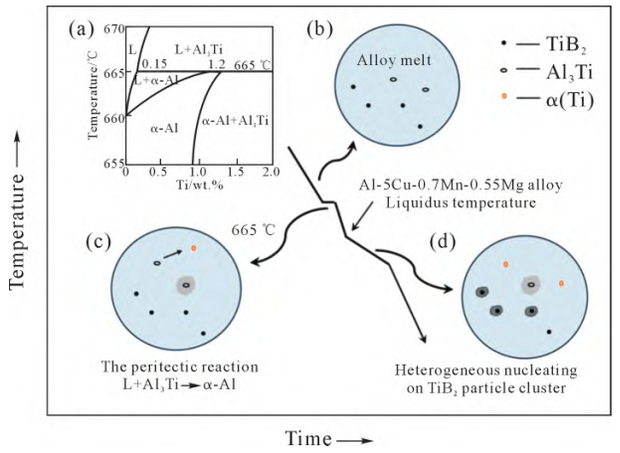


图 5 添加 Al-Ti-B 细化剂的 Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg 合金熔体凝固过程示意图：(a) Al-Ti 二元平衡相图富 Al 角；(b~d) 凝固过程示意图[25]

Fig.5 Schematic diagram of the solidification process of the Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg alloy melt refined using Al-Ti-B refiners: (a) Al-rich corner of the Al-Ti binary equilibrium phase diagram; (b~d) schematic diagram of the solidification process[25]

5c 和 d)，其通过良好的晶体结构匹配和低界面能，能够有效促进形核，共同实现了Al-Cu-Mn-Mg 合金晶粒的细化。

对比 4 种 Al-Ti-B 细化剂的作用机制，在 Al-3Ti-1B 和 Al-4Ti-1B 中，大量 TiB_2 颗粒团因相互碰撞而结合为尺寸更大的颗粒团，沉降速率增大，导致熔体中的有效形核基底数量减少。对于 Al-5Ti-1B，随着熔体温度降低，未来得及形核的 Al_3Ti 相分解成 α(Ti)相沉淀析出，从而减少了能够作为有效形核基底的 Al_3Ti 相。由于 Al-5Ti-2B 的 Ti/B 比为 2.5/1，Al_3Ti 相相对较少，大部分 Ti 元素以 TiB_2 相形式存在，分解析出的 α(Ti)较少，可以充当形核颗粒数目较多，表现出最优的晶粒细化效果。

2.3 Al–Ti–B 细化剂对 Al–5Cu–0.7Mn–0.55Mg 合金热裂倾向性的影响

图 6 为添加不同 Al-Ti-B 晶粒细化剂后，Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg 合金试棒的宏观俯视图。实验结果表明，所有合金的最长试棒(1#)均出现断裂现象，但断裂位置存在明显差异。加入 Al-3Ti-1B 和 Al-5Ti-1B 的合金试棒，其断裂发生在球型腔连接的热节处，而添加 Al-4Ti-1B 和 Al-5Ti-2B 的合金试棒则出现在与浇道连接的热节处断裂。除了最长试棒 1# 的断裂现象外，在 2# 和 3# 试棒上也观察到了不同程度的裂纹扩展现象(图 7)。

不同长度试棒的宏观裂纹情况与添加 Al-Ti-B 细化剂的种类密切相关。添加 Al-4Ti-1B 的合金试棒表现出最高的热裂敏感性，存在 5 处热裂纹缺陷。

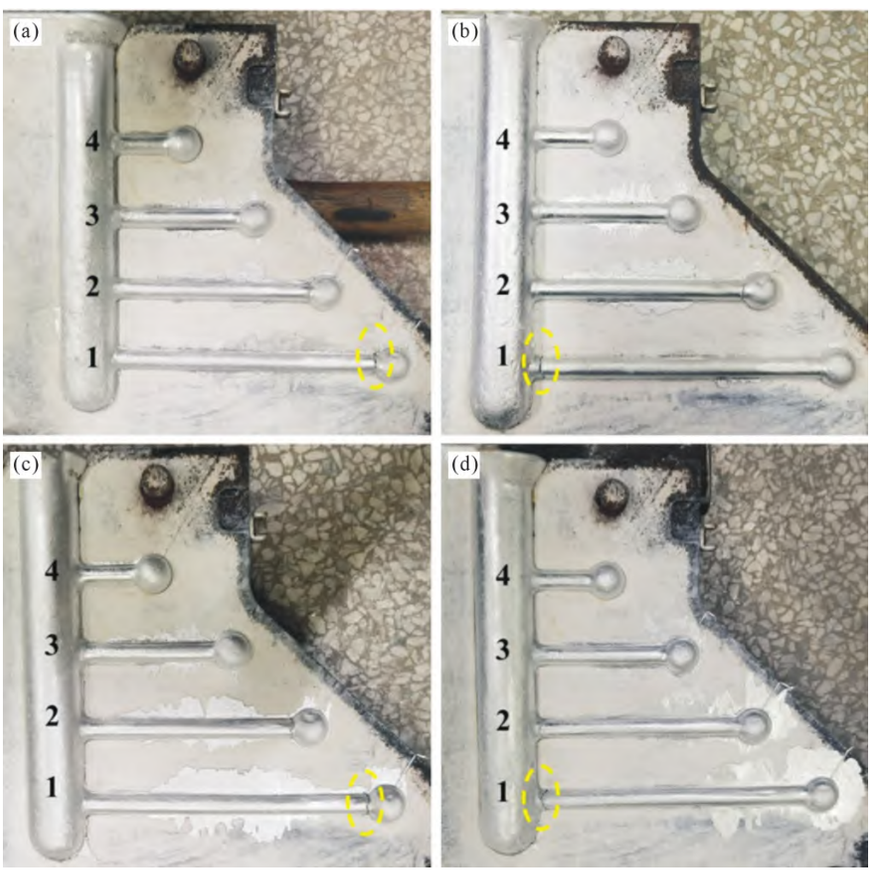


图 6 添加 Al-Ti-B 细化剂的 Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg 合金宏观裂纹：(a) Al-3Ti-1B; (b) Al-4Ti-1B; (c) Al-5Ti-1B; (d) Al-5Ti-2B

Fig.6 Macrocracks in the Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg alloy refined using Al-Ti-B refiners: (a) Al-3Ti-1B; (b) Al-4Ti-1B; (c) Al-5Ti-1B; (d) Al-5Ti-2B

中国知网 https://www.cnki.net

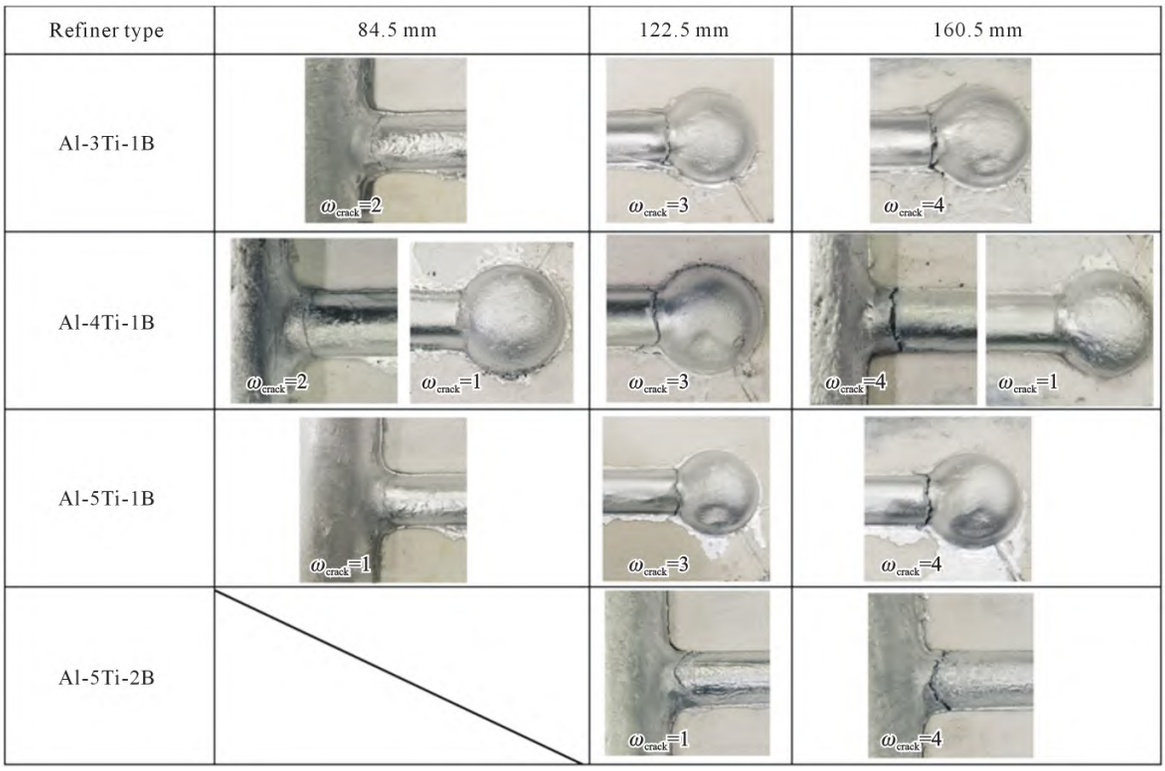


图 7　Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg 合金宏观裂纹细节

Fig.7　Detailed photographs for the macrocrack of the Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg alloy

1# 和 3# 试棒在球型腔连接的热节处出现细小裂纹,2# 试棒的球型腔连接处产生严重裂纹,而 3# 试棒的浇道热节处则出现长细裂纹。相比之下,对于添加 Al-3Ti-1B 和 Al-5Ti-1B 的合金试棒的裂纹分布呈现相似规律,裂纹均集中在球型腔处的 2# 试棒和浇道处的 3# 试棒,其中 Al-3Ti-1B 的合金试棒断裂特征较 Al-5Ti-1B 细化的合金严重，但优于 Al-4Ti-1B。加入 Al-5Ti-2B 的合金仅在 2# 试棒的浇道处发现半裂纹,表现出最优的抗热裂性能。

为进一步量化评估热裂倾向性,基于公式(1)计算得到热裂纹倾向性指数的影响因子(ω_{crack}、f_{length}、$f_{location}$)和 HCS 指数,结果如图 8 所示。数据显示,添加 Al-3Ti-1B、Al-4Ti-1B、Al-5Ti-1B 和 Al-5Ti-2B 细化剂后，合金的 HCS 指数分别为 112、136、96 和 24。其中添加 Al-5Ti-2B 的合金 HCS 指数最低(24),

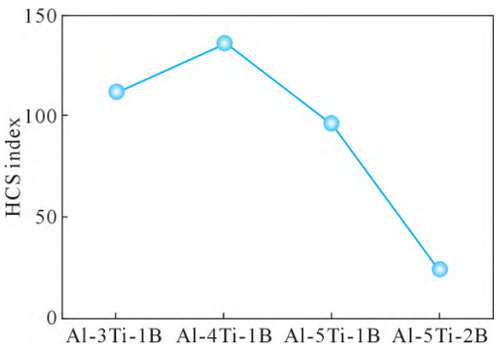


图 8　Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg 合金 HCS 指数

Fig.8　HCS indices of the Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg alloy

热裂倾向性最小;而添加 Al-4Ti-1B 的合金 HCS 指数最高(136),热裂倾向性最大,容易产生热裂纹。添加 Al-3Ti-1B 和 Al-5Ti-1B 的合金 HCS 指数分别为 112 和 93,两者接近且均优于 Al-4Ti-1B。上述量化结果与前文宏观观察到的热裂纹情况完全吻合。

图 9 为添加不同 Al-Ti-B 细化剂的 Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg 合金热裂纹处微观组织及断口形貌。根据相关文献[21,23,27],合金凝固收缩过程中,液相比例逐渐减少,固相比例增多,最终形成由大量枝晶搭接而成的骨架。随着凝固收缩进程的进行,晶间搭桥的数量减少，当收缩应力超过合金的强度临界点时，裂纹开始萌生并扩展。由于凝固末期液相不足,裂纹难以通过熔体补缩修复,直至凝固收缩应力增至使晶间搭桥完全断裂,形成热裂纹。热裂纹断口呈现出凹凸不平的粗糙表面和微小韧窝特征。对比 4 种 Al-Ti-B 细化剂的作用效果,添加 Al-4Ti-1B 的合金晶粒微观组织较粗大，晶界处分布着大量热裂纹(图 9c)。进一步观察发现(图 9d),在凝固收缩过程中,2 个相互分离的晶粒间的枝晶臂彼此接触较少,形成的搭桥数量有限,裂纹处呈现平滑枝晶臂,表面仅覆盖一层较薄的液膜,液相补缩能力较弱,导致热裂倾向性较高；对于添加 Al-3Ti-1B 和Al-5Ti-1B 的合金,晶间搭桥数量有所增加,但两者差异不明显,在晶间观察到补缩的液相和被拉断的晶间搭桥,同时形成液膜,如图 9a 和 b, e 和 f 所示。液膜虽具有

中国知网　https://www.cnki.net

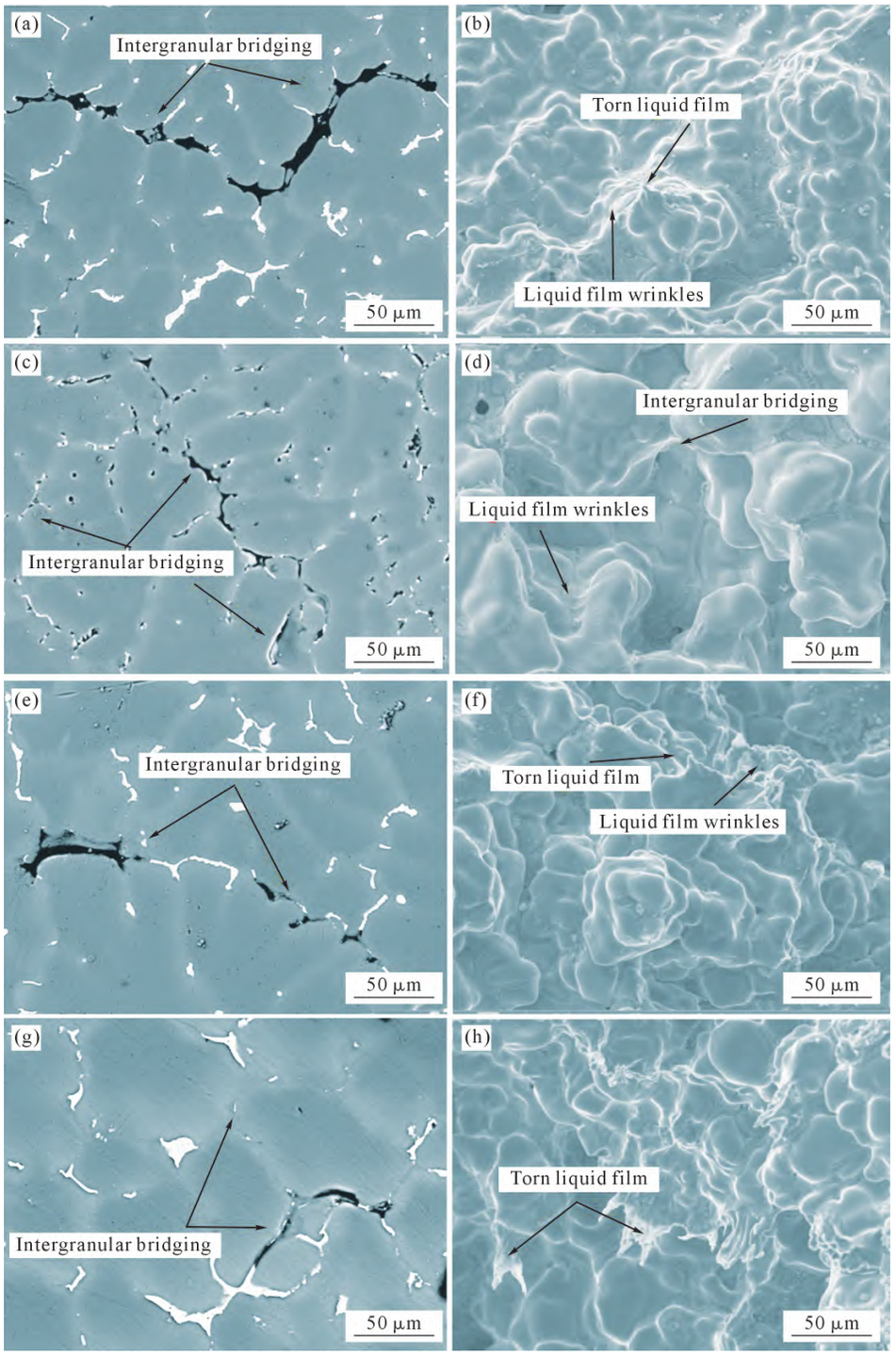


图 9 添加 Al-Ti-B 细化剂的 Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg 合金热裂纹微观组织及断口形貌：(a, b) Al-3Ti-1B; (c, d) Al-4Ti-1B; (e, f) Al-5Ti-1B; (g, h) Al-5Ti-2B

Fig.9 Hot crack microstructure and fracture morphology of the Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg alloy refined using Al-Ti-B refiuers: (a, b) Al-3Ti-1B; (c, d) Al-4Ti-1B; (e, f) Al-5Ti-1B; (g, h) Al-5Ti-2B

一定强度，但当晶间搭桥难以抵抗收缩应力时，液膜会被拉扯，热裂纹就会扩展。相比之下，添加 Al-5Ti-2B 细化剂的合金微观组织均匀细小，裂纹数量较少，其晶间搭桥数量显著增加，大量的搭桥有效抵抗了收缩时的应力，提高了抗热裂性能。此外，该组合金液膜形成的褶皱程度表明其厚度明显增加，进一步阻碍了热裂纹的扩展，降低了合金的热裂倾向性。

3 结论

(1)Al-Ti-B 细化剂的细化效能主要依赖 Al_3Ti 和 TiB_2 的双相协同作用。随着 Ti/B 质量比从 5/1→4/1→3/1→2.5/1 的逐步降低，细化剂中 Al_3Ti 相呈逐渐减少的趋势，TiB_2 相逐渐增多。

中国知网 https://www.cnki.net

(2)在 B 含量均为 0.3%的控制条件下，Al-5Ti-2B 细化剂展现出最优异的晶粒细化能力。经该细化剂处理的 Al-5Cu-0.7Mn-0.55Mg 合金，平均晶粒尺寸降至 88.00 μm，与 Al-3Ti-1B(162.07 μm)、Al-4Ti-1B (113.73 μm)和 Al-5Ti-1B(107.81 μm)细化剂处理的合金相比，晶粒尺寸分别降低了 45.7%、22.6%和 18.4%。

(3)添加 Al-3Ti-1B、Al-4Ti-1B、Al-5Ti-1B 和 Al-5Ti-2B 细化剂后，合金的 HCS 指数分别为 112、136、96 和 24。Al-5Ti-2B 细化剂展现出卓越的抗热裂性能，这归因于 Al_3Ti 相和 TiB_2 相提供了较多的异质形核点，使微观组织细小均匀，形成大量晶间搭桥，并产生较厚的液膜褶皱，有效阻碍了裂纹的扩展，显著降低了合金的热裂倾向性。

参考文献：

[1] 尹红安，罗宏亮. 铝合金板材在汽车制造中的应用[J]. 汽车测试报告，2024(10): 59-61.
YIN H A, LUO H L. The application of aluminum alloy sheets in automotive manufacturing[J]. Car Test Report, 2024(10): 59-61.

[2] 陈子勇，舒群，陈玉勇. 高强铸造铝铜合金显微组织与力学性能的研究[J]. 材料科学与工艺，2007(5): 718-722.
CHEN Z Y, SHU Q, CHEN Y Y. The study of microstructure and mechanical properties of high strength and toughness casting Al-Cu alloy[J]. Materials Science & Technology, 2007(5): 718-722.

[3] 张华炜，刘悦，范同祥. 铸造耐热铝合金的研究进展及展望[J]. 材料导报，2022, 36(2): 153-161.
ZHANG H W, LIU Y, FAN T X. Progress and prospect of cast heat-resistant aluminum alloy[J]. Materials Reports, 2022, 36(2): 153-161.

[4] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. Materials & Design, 2013, 56: 862-871.

[5] 张晗，郝启堂，李新雷，薛彦庆，余文涛，娄泽宇，王培卿. 热处理工艺对 Al-Cu-Mn-Mg 合金微观组织与力学性能的影响[J]. 材料热处理学报，2023, 44(3): 58-67.
ZHANG H, HAO Q T, LI X L, XUE Y Q, YU W T, LOU Z Y, WANG P Q. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mn-Mg alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(3): 58-67.

[6] 丁万武，祝江涛，赵文军，夏天东. Al-5Ti-B 合金的微观组织演变及其对纯铝的细化作用[J]. 材料热处理学报，2014, 35(S2): 40-45.
DING W W, ZHU J T, ZHAO W J, XIA T D. Microstructure evolution and refining performances of Al-5Ti-B alloy on pure aluminum[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35 (S2): 40-45.

[7] 韩延峰，张瀚龙，徐钧，张佼，孙宝德. 基于 Al-Ti-B 细化剂的铝合金异质形核机制研究进展[J]. 中国材料进展，2018, 37(8): 632-637.
HAN Y F, ZHANG H L, XU J, ZHANG J, SUN B D. Development of grain refining mechanism of Al alloys by Al-Ti-B master alloys[J]. Materials China, 2018, 37(8): 632-637.

[8] 杨光，文胜平，雷志国，黄晖，熊湘沅. 铝合金细化剂细化行为研究现状与展望[J]. 铸造，2024, 73(4): 445-452.
YANG G, WEN S P, LEI Z G, HUANG H, XIONG X Y. Research status and prospects of refining behavior of aluminum alloy refiners[J]. Foundry, 2024, 73(4): 445-452.

[9] DE ALBUQUERQUE SOUSA S M, SALDANHA F E, DE GOUVEIA G L, GARCIA, SPINELLI J E. NbB refining capability: Effects of slow and rapid solidification on dendritic spacings and grain sizes of a 6201 alloy[J]. Materials Letters, 2022, 315: 131960.

[10] LI G S, XU S K, WAN T J, LIU H T, XIE L L, ZHANG M Y, LI J H. Effect of intermediate-temperature severe plastic deformation on microstructure evolution, mechanical properties and corrosion behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Characterization, 2023, 205: 113248.

[11] ZHU M, YANG G C, YAO L J, CHENG S L, ZHOU Y H. Influence of Al-Ti-B addition on the microstructure and mechanical properties of A356 alloys[J]. Rare Metals, 2009, 28(2): 181-186.

[12] 徐萌，陈刚，赵玉涛，王军，周丹，轩动华. 稀土对 Al-Ti-B 合金中 Al_3Ti 颗粒形貌的影响[J]. 材料导报，2009, 23(S1): 39-41, 44.
XU M, CHEN G, ZHAO Y T, WANG J, ZHOU D, XUAN D H. Influence of RE on $A1_3Ti$ particle shape in Al-Ti-B alloy[J]. Materials Reports, 2009, 23(S1): 39-41, 44.

[13] 陆子川. 金属间化合物 Al_3Ti 合金的强韧化机理研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2018.
LIU Z C. Toughening mechanism investigations of intermetallic Al_3Ti alloy[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.

[14] WANG X, YING Z Z, HU E, MA J T, ZHANG X Q, MA T F, WANG X H. Effect of Al-Ti-B-Er on the microstructure and properties of ultrahigh-strength aluminum alloy[J]. Crystals, 2024, 14 (8): 695.

[15] 王山铭，李新雷，陈易山，王宇航，薛彦庆. TiB_2 含量对 TiB_2/Al-4.5Cu-1Mn-0.3Mg 复合材料微观组织及力学性能的影响[J]. 铸造技术，2025, 46(1): 65-72.
WANG S M, LI X L, CHEN Y S, WANG Y H, XUE Y Q. Effect of TiB_2 content on the microstructure and mechanical properties of TiB_2/Al-4.5Cu-1Mn-0.3Mg composites [J]. Foundry Technology, 2025, 46(1): 65-72.

[16] WEI S Y, WANG C, YOU J, QIU D, GAO Y P, XU H, XU J, WANG H Y. Substantial grain refinement of Al-Mn-Si alloys mediated by collaborative effect of Al-5Ti-1B refiner and sub-rapid solidification [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 187: 230-239.

[17] VONČINA M, MEDVED J, JERINA L, PAULIN I, CVAHTE P, STEINACHER M. The impact of Al-Ti-B grain-refiners from different manufacturers on wrought Al-alloy[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2019, 64(2): 739-746.

[18] 申玉彬，于占举，张海鹏，林波. 铝钛硼中间合金对 A356 合金组织遗传效应研究[J]. 铸造技术，2020, 41(5): 437-439.
SHEN Y B, YU Z J, ZHANG H P, LIN B. Study on microstructure heredity effects of Al-Ti-B master alloy on A356 alloy[J]. Foundry Technology, 2020, 41(5): 437-439.

[19] GANJEHFARD K, TAGHIABADI R, NOGHANI T M, GHONC-

中国知网 https://www.cnki.net

HEH M H. Tensile properties and hot tearing susceptibility of cast Al-Cu alloys containing excess Fe and Si[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28: 718-728.

[20] SUN G Y, SU N Y, DU M Z, CHEN L H, WANG C S. Fabrication and properties of Al-Cu-Mg-Zn series alloys with low hot cracking tendency for liquid forging[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 230: 012036.

[21] 石磊. Al-10Si-2Cu 合金共晶团的细化及其对热裂敏感性的影响[D]. 济南:山东大学,2015.
SHI L. The eutectic cells refinement of Al-10Si-2Cu alloy and its impact on hot tears susceptibility[D]. Jinan: Shandong University, 2015.

[22] SABAU A S, MILLIGAN B K, MIRMIRAN S, GLASPIE C, SHYAM A, HAYNES J A, RODRIGUEZ A F, VILLARREAL J A G, TALAMANTES J. Grain refinement effect on the hot-tearing resistance of higher-temperature Al-Cu-Mn-Zr alloys[J]. Metals, 2020, 10(4): 430.

[23] 王宇翔. 稀土元素 Y、Ce 对铝铜合金热裂的影响[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2022.
WANG Y X. Effect of rare earth elements Y and Ce on hot tearing of Al-Cu alloy[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.

[24] LI P T, LIU S D, ZHANG L L, LIU X F. Grain refinement of A356 alloy by Al-Ti-B-C master alloy and its effect on mechanical properties[J]. Materials & Design, 2012, 47: 522-528.

[25] 徐莉萍. Al-Ti-B-Er 体系相关系及中间合金对 6111 铝合金细化效果研究[D]. 南宁:广西大学,2023.
XU L P. Study on the phase relationship of Al-Ti-B-Er system and the refinement effect of intermediate alloy on 6111 aluminum alloy [D]. Nanning: Guangxi University, 2023.

[26] 刘晓滕. Al-Ti-B/C 中间合金及 Y、Gd 对 AZ31 镁合金晶粒尺寸和力学性能的影响[D]. 大连:大连理工大学,2017.
LIU X T. Effects of Al-Ti-B/C master alloy and Y,Gd on grain size and mechanical properties of AZ31 alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.

[27] LI X X, LIU S M, LIU Z, WANG Y, WEI Z Q, DU X D, WANG Z, WANG F. Influence of Nd on hot tearing susceptibility and mechanism of Mg-Zn-Y-Zr alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(10): 6714-6726.

(责任编辑:宫文婧)

中国知网 https://www.cnki.net