

# 新型铝合金细化 / 净化复合熔剂 对 A356.2 组织和性能的影响

郑毅坚

(维苏威铸造科技(江苏)有限公司, 江苏常熟 215537)

**摘要:** 为提高A356.2铸造铝合金的力学性能, 开发了一种新型复合熔剂(NUCLEANT 1582)用于铝合金熔体净化和其晶粒细化, 该复合熔剂主要成分为含Ti、B元素的无机盐。通过第一阶段研究发现, 在加入量为0.05%时, 获得明显的细化效果; 随着复合熔剂加入量的提高, 铝合金晶粒细化效果随之提高; 当复合熔剂的加入量超过0.2%时, 细化效果提升趋缓; 第二阶段将新型复合熔剂与Al-5Ti-1B晶粒细化剂进行对比, 结果表明: 新型复合熔剂的细化效果比Al-5Ti-1B细化剂提高了15%, 抗拉强度提高了5.8%, 伸长率提高了190%, 实现了在不增加Ti元素含量的基础上提高了晶粒细化效果。

**关键词:** A356.2铝合金; 晶粒细化; 新型复合熔剂; 力学性能

在“双碳”背景下, 新能源汽车取代传统石化燃料汽车成了长期趋势。根据中国汽车协会公布数据显示, 2022年新能源汽车销售占乘用车总销量的比例达到25.6%<sup>[1]</sup>。甚至多家知名汽车公司已经公布了停止研究燃油车的时间表。根据相关机构做出的预测, 2025年新能源车全球销量将达到1 800万辆<sup>[2]</sup>。然而, 由于电池的应用大大提高了新能源汽车车身的重量, 例如, 相同型号的新能源汽车BMW iX3比燃油车BMW X3重了30%, 重的车身意味着高能耗。为了降低能耗, 提高汽车续航里程, 新能源汽车对“轻量化”的要求越来越迫切。为了降低车身重量, 新能源汽车厂大量采用更多铸铝安全件以替代原来的铸铁件, 例如: 转向节、刹车卡钳、副车架等, 这些铸件普遍采用A356.2铸造铝合金。因此, 提高A356.2的合金性能有助于汽车的“轻量化”<sup>[3]</sup>。

众所周知, 晶粒细化是提高合金性能的主要途径之一<sup>[4]</sup>。根据霍尔-佩奇(Hall-Petch)<sup>[5]</sup>公式可知, 合金的屈服强度随着晶粒尺寸的减小而增加, 根据位错塞积理论<sup>[6]</sup>可知, 合金的塑性也会随着晶粒尺寸的减小而增加。此外, 对A356.2铸造铝合金的晶粒细化有助于提高铝液流动性, 增强补缩, 减少缩孔缩松缺陷的产生, 从而提高铸件质量。

目前在工业制造过程中通过添加晶粒细化剂已成为常见的一种方法<sup>[7]</sup>。铝合金铸造厂通常加入Al-5Ti-1B中间合金的方式来获得TiB<sub>2</sub>作为晶粒生长的形核核心。在相同体积内, TiB<sub>2</sub>颗粒更弥散, 更多地分布在Al基体中, 从而产生形核核心越多, 细化效果越显著<sup>[8-10]</sup>。然而, Al-5Ti-1B晶粒细化剂以高浓度的固态形式加入, 在长时间熔融的过程中难溶的TiB<sub>2</sub>颗粒容易聚集在一起, 减少了形核核心的数量, 降低了晶粒细化的效果。因此, 为了获得更多的形核核心, 铸造厂一般通过加大Al-5Ti-1B中间合金添加量的方式。而且在A356.2铝合金中Ti是受控元素, 要求Ti的含量低于0.2%; 此外, 过高Ti的加入容易在铝液底部形成糊状的沉淀物, 难以清理, 甚至污染铝液。为了解决上述问题, 本试验开发了一种新型复合熔剂, 用于铝合金熔体净化和晶粒细化。该复合熔剂为直径3~5 mm的不规则颗粒, 主要成分为含Ti、B元素的无机盐。本文主要研究新型复合熔剂添入比例对晶粒细化效果的影响, 并对比了新型复合熔剂与常见的

作者简介:

郑毅坚(1978-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为铝合金铸造。E-mail: 27261642@qq.com

中图分类号: TG164.21;  
TG113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)  
10-1412-08

收稿日期:

2023-07-31 收到初稿,  
2023-11-28 收到修订稿。

Al-5Ti-1B晶粒细化剂在工业生产中对A356.2铝合金的细化效果。

# 1 试验与方法

## 1.1 试样的制备

本试验中所用的铸铝60%为再生铝合金，本次试验第一阶段探究了新型复合熔剂在不同加入量情况下对A356.2合金晶粒细化效果的影响，工艺路线图如图1所示。先将铝块放在SG2-5-10井式电阻炉中于800℃熔化，得到铝熔体；接着将新型复合熔剂加入铝熔体中，并用石墨棒不断搅拌，保温30 min后，加入除气剂，并将钢管插在溶液中；钢管中通入高纯氩气3 min，将温度降低到740℃后浇注于250℃预热的铸铁模具中，通过铸造得到A356.2铸造铝合金。在距离Φ30 mm铸锭底部以上20 mm，或拉伸试棒夹持段中心处切开得到断面，采用偏光金相显微镜进行观察，采

用截线法（ASTM standard E112-10）测出平均晶粒尺寸，根据截线法（ASTM standard E112-10）评估平均晶粒尺寸。

为了研究新型复合熔剂在实际工业应用中的细化效果，本研究第二阶段在实际工业条件下进行，将新型复合熔剂和Al-5Ti-1B晶粒细化剂的细化效果进行对比。根据加入的新型复合熔剂中Ti元素实际含量，按比例加入Al-5Ti-1B晶粒细化剂，使铝熔体中Ti含量保持相当，最终A356.2合金中元素含量如表1所示。添加Al-5Ti-1B晶粒细化剂的铸造工艺如图2所示，将熔化好的铝液倒入坩埚，达到750℃后，加入杆状Al-5Ti-1B晶粒细化剂，然后使用金属液处理站MTS1500在铝液中旋转造旋涡，在漩涡中加入除渣剂（颗粒状），挡板下降消除漩涡后除气900 s；处理完成后进行扒渣，随后进行浇注试样；T6热处理后（540℃固溶处理8 h，70℃水中淬火，200℃时效4 h），对表面进行精加

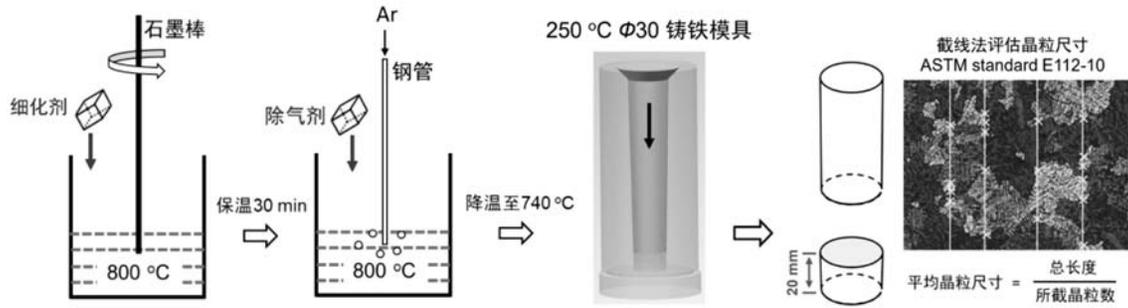


图1 添加新型复合熔剂的A356.2铝合金制备过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of preparation process of A356.2 aluminum alloy with new multi-function flux

表1 加入不同晶粒细化剂情况下A356.2铝合金中的元素含量

Table 1 The content of elements in A356.2 aluminum alloy with different grain refiners

加入细化剂的种类	Si	Mg	Ti	Fe	Mn	Cu	Zn	Al
NUCLEANT 1582	6.5~7.5	0.3~0.45	0.114	≤0.12	≤0.05	≤0.1	≤0.05	余量
Al-5Ti-1B	6.5~7.5	0.3~0.45	0.122	≤0.12	≤0.05	≤0.1	≤0.05	余量

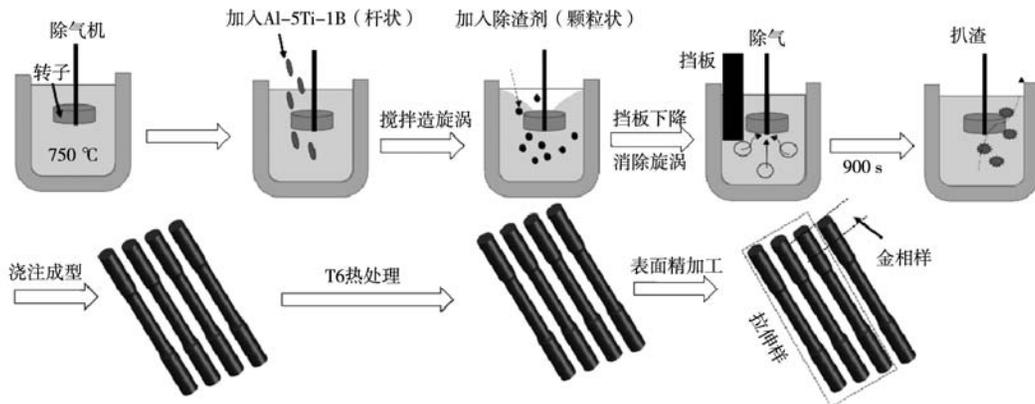


图2 添加Al-5Ti-1B晶粒细化剂的A356.2铝合金制备过程示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the preparation process of A356.2 aluminum alloy with Al-5Ti-1B grain refiner addition

工, 获得三根作为拉伸试样; 另一根取上方取15 mm长试样作为金相样。图3为添加新型复合熔剂的铸造工艺流程图, 将熔化好的铝液倒入坩埚, 达到750 °C后, 然后使用金属液处理站MTS1500在铝液中旋转造旋涡, 在旋涡中加入新型熔剂添加剂(颗粒状), 挡板下降消除旋涡后除气900 s; 处理完成后进行扒渣, 随后进行浇注试样, T6热处理后(540 °C固溶处理8 h,

70 °C水中淬火, 200 °C时效处理4 h), 对表面进行精加工, 得到三根拉棒试样; 另一根在上方取15 mm长试样作为金相样。该新型熔剂添加剂同时具有细化晶粒和除渣的效果, 在熔渣的周围形成低熔点的盐进行包裹, 使渣和铝更好地分离, 因此不用额外加入除渣剂, 精简了工艺流程。

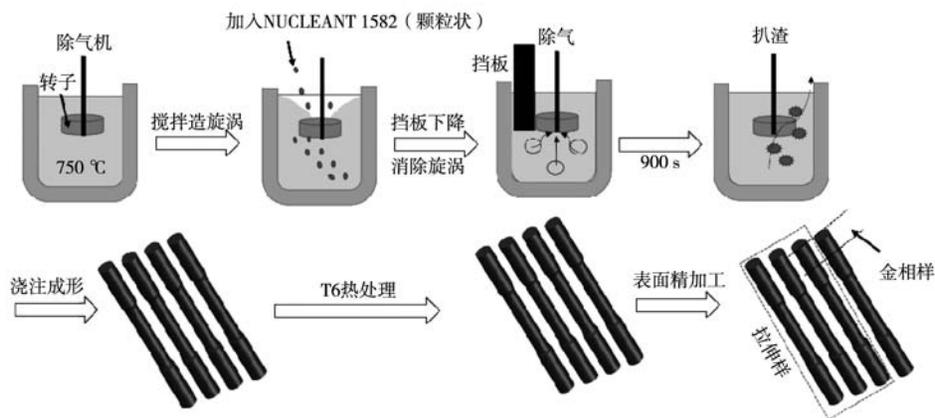


图3 添加NUCLEANT 1582晶粒细化剂的A356.2铝合金制备过程示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the preparation process of A356.2 aluminum alloy with NUCLEANT 1582 grain refiner addition

## 1.2 微观组织观察与力学性能分析

通过偏光金相显微镜测量晶粒尺寸, 观察前用自动磨抛机将试样表面打磨抛光, 接着对观察表面进行阳极镀膜处理。腐蚀剂为1.5%~2%的 $\text{HBF}_4$ 溶液, 腐蚀温度为25~40 °C, 直流电压20~25 V, 腐蚀时间80 s。

通过超景深光学显微镜(KEYENCEVHX-6000)和带能谱(EDS)和电子反向散射衍射(EBSD)探针的场发射扫描电子显微镜(SEM5000)观察焊缝的微观结构和元素分布。进行EBSD分析前需将磨抛好的样品额外放置在UniPOL V0900振动抛光机上抛光4 h, 所用抛光液为标乐0.03  $\mu\text{m}$ 胶体氧化硅悬液。

本文的力学性能测试均在微机控制电子万能试验机(SUNS UTM5105)上进行, 拉伸试样示意图如图4所示, 拉伸速度为3 mm/min, 每组试样为三根。

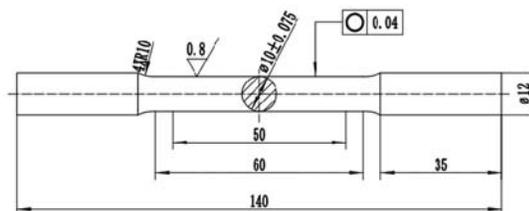


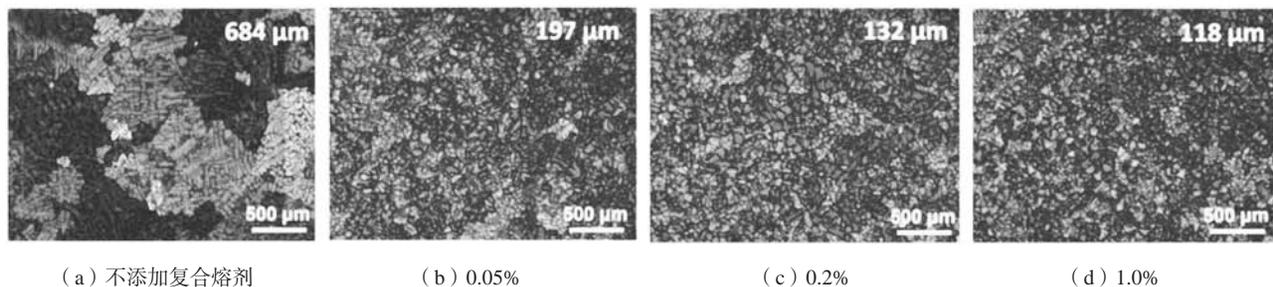
图4 拉伸试样尺寸

Fig. 4 Tensile specimen size

## 2 结果与讨论

### 2.1 晶粒细化剂加入量对 A356.2 合金晶粒细化效果的影响

不同新型复合熔剂添加量后浇注的A356.2铸棒偏光金相照片如图5所示。不同晶粒细化剂对A356.2细晶



(a) 不添加复合熔剂

(b) 0.05%

(c) 0.2%

(d) 1.0%

图5 不同新型复合熔剂添加量后浇注的 A356.2 铸棒偏光金相形貌

Fig. 5 The polarized metallographic morphology of A356.2 cast rod with different new multi-function flux

效果如图6所示,其中Al-5Ti-1B晶粒细化剂细化效果数据来源于参考文献。由图5可知,在不添加熔剂添加剂时,平均晶粒尺寸为684  $\mu\text{m}$ ;加入新型复合熔剂能有效对A356.2进行细化,随着加入量的提高,细化效果随之提高,加入0.05%效果明显,平均晶粒尺寸仅为197  $\mu\text{m}$ ,晶粒细化率高达712%;当添加剂的含量从0.2%至1%时,平均晶粒尺寸由132  $\mu\text{m}$ 变为118  $\mu\text{m}$ ,晶粒细化效果改变不大。根据硼化物理论,  $\text{TiB}_2$ 作为 $\alpha$ -Al基体的形核核心,铝原子可以在 $\text{TiB}_2$ 上向外生长,从而起到细化晶粒的作用,但是当添加量过多时,过量的硼化物会发生聚集、沉淀等现象<sup>[11]</sup>,从而使得细化效果提升不明显。另一方面通过初步与相关文献<sup>[12]</sup>试验结果对比,发现NUCLEANT 1582晶粒细化剂的效果优于Al-5Ti-1B晶粒细化剂。

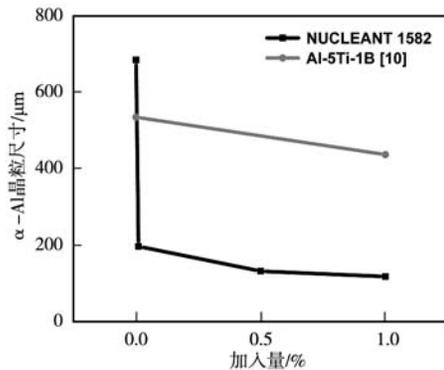
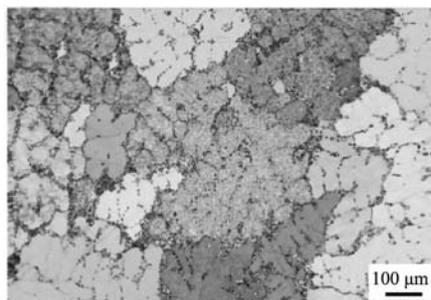


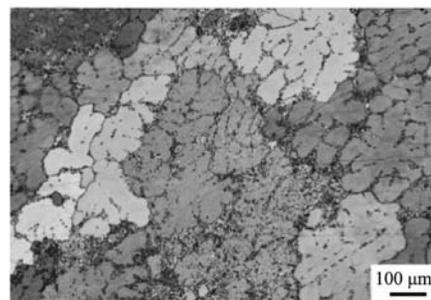
图6 晶粒细化剂添加量对A356.2细晶效果的影响  
Fig. 6 The effect of grain refiner addition on the fine grain effect of A356.2 alloy

## 2.2 新型复合熔剂与Al-5Ti-1B添加剂对A356.2铸造铝合金晶粒细化程度的影响

为了进一步探究新型复合熔剂与常见的Al-5Ti-1B晶粒细化剂对晶粒细化效果的影响,本研究在实际工业应用条件下进行了两种晶粒细化剂的对比试验。由2.1结果可知当新型复合熔剂添加量超过0.2%时,晶粒细化效果不明显,添加量在0.05%时效果显著,综合考



(a) Al-5Ti-1B



(b) NUCLEANT 1582

图8 不同晶粒细化剂下的晶粒取向分布

Fig. 8 Grain orientation distribution under different grain refiners

虑细化效率和添加量的影响,本次试验中新型熔剂添加剂添加量为0.1%;同时为了保证相同的Ti含量,按照Ti含量比例加入一定量的Al-5Ti-1B,最终铝基体中Ti含量如表1所示。

由文献[13]可知,铸造时凝固速率会影响晶粒细化效率,因此通过需要保证两者相同的凝固速率。测量方法示意图如图7所示,在金相中选取一个枝晶臂,除以枝晶间距数量,得到一个枝晶臂上的二次枝晶间距,对试样的中心附近位置多次量取(图7红线处),求取平均值。

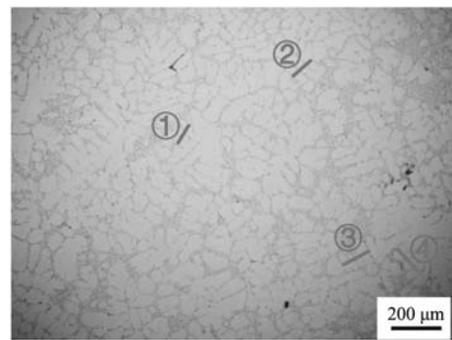


图7 二次枝晶间距测量示意图

Fig. 7 Secondary dendrite spacing measurement diagram

如表2所示为两种晶粒细化剂下的平均二次枝晶间距,由结果可知,二次枝晶间距相当,意味着有几乎相同的凝固速度。

表2 不同熔剂添加剂下A356.2铝合金的平均二次枝晶间距  
Table 2 Average secondary dendrite arm spacing of A356.2 aluminum alloy with different solvent additives

熔剂种类	平均二次枝晶间距/ $\mu\text{m}$
NUCLEANT 1582	41.94
Al-5Ti-1B	42.20

### 2.2.1 EBSD测试与分析

EBSD测得的晶粒尺寸相对于截线法更加精确,并且可以观察晶粒的取向分布,如图8所示。由图8可

知, 新型复合熔剂铸造的铝合金晶粒相对于Al-5Ti-1B晶粒细化剂下铸造的铝合金尺寸大小以及分布更加均匀。图9为加入不同晶粒细化剂下的平均晶粒尺寸大小, 晶粒尺寸由EBSD后处理软件AZtecCrystal统计得, 数据显示加入Al-5Ti-1B平均晶粒尺寸为236.8  $\mu\text{m}$ ,

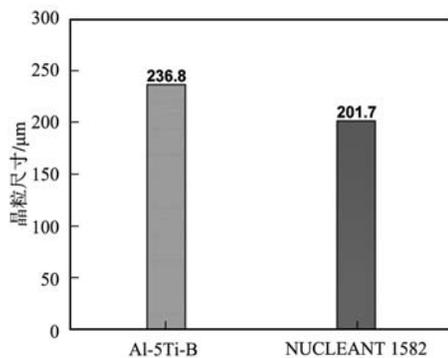
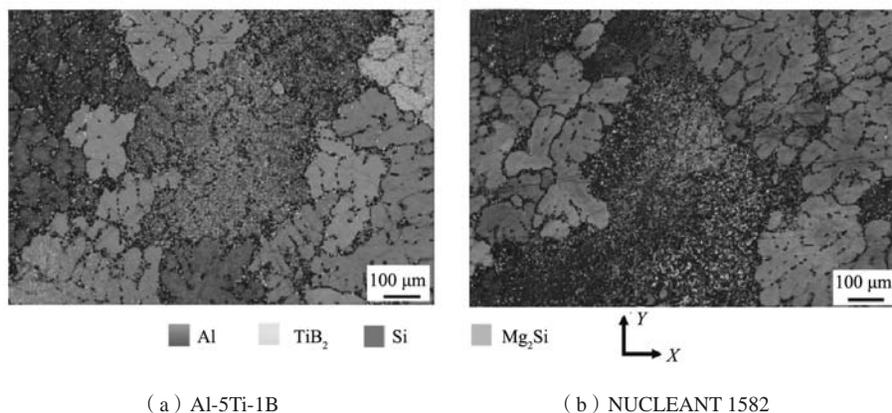


图9 加入不同晶粒细化剂种类下A356.2铝合金中 $\alpha$ -Al相平均晶粒尺寸

Fig. 9 Average grain size of  $\alpha$ -Al phase in A356.2 aluminum alloy with different grain refiners

加入新型复合熔剂后晶粒细化效果明显提升, 平均晶粒尺寸约为201.7  $\mu\text{m}$ , 晶粒细化程度提高了约15%, 新型复合熔剂和Al-5Ti-1B晶粒细化剂在Ti含量相当的情况下, 获得了更优异的细化效果。

图10为加入不同晶粒细化后A356.2铝合金的相分布图, 由图可知相成分主要为 $\alpha$ -Al、共晶Si、 $\text{TiB}_2$ 和 $\text{Mg}_2\text{Si}$ ; 由图可见 $\alpha$ -Al的晶粒尺寸远大于其他相。图11为不同晶粒细化剂种类下A356.2铝合金中 $\text{TiB}_2$ 的相含量, 该含量由EBSD后处理软件AZtecCrystal统计, 加入Al-5Ti-1B后铝合金的中 $\text{TiB}_2$ 相含量仅为0.2%, 而加入新型复合溶剂后 $\text{TiB}_2$ 含量约为1%。但是由于 $\text{TiB}_2$ 颗粒远小于 $\alpha$ -Al的晶粒, 因此含量较少的情况下, 不可用于定量分析, 只可用于趋势分析。图11可明显看出加入NUCLEANT 1582复合熔剂的铝合金中产生 $\text{TiB}_2$ 颗粒数量明显更高。当 $\text{TiB}_2$ 的含量较低(1%以下)时主要为 $\alpha$ -Al提供非均质形核核心, 主要起到细化晶粒的作用<sup>[14]</sup>, 因此加入新型晶粒细化剂后出现较多的 $\text{TiB}_2$ 颗粒是其晶粒细化的主要原因。



(a) Al-5Ti-1B

(b) NUCLEANT 1582

图10 加入不同晶粒细化剂种类下A356.2铝合金的相分布图

Fig. 10 Phase distribution of A356.2 aluminum alloy with different grain refiners

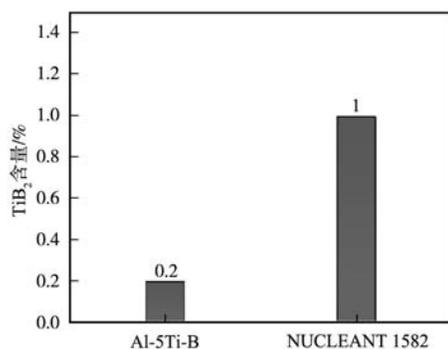


图11 加入不同晶粒细化剂种类下A356.2铝合金中 $\text{TiB}_2$ 相含量

Fig. 11 The content of  $\text{TiB}_2$  phase in A356.2 aluminum alloy with different grain refiners

## 2.2.2 EDS测试与分析

加入Al-5Ti-1B晶粒细化剂后A356.2铸造铝合金EDS元素面扫描图如图12所示; 加入新型复合熔剂后A356.2铸造铝合金EDS元素面扫描图如图13所示。从两者元素分布对比可以看出, 加入Al-5Ti-1B晶粒细化剂后硅元素偏聚现象较为严重, 在拉伸过程中, Si颗粒附近容易发生脆性断裂和产生微裂纹<sup>[15]</sup>。当合金中Si元素含量大于3%~5%时, 晶粒细化效果被显著削弱导致的晶粒粗化<sup>[16-17]</sup>。Si在液体中的富集接近 $\text{TiB}_2$ 表面可进一步阻碍 $\alpha$ -Al形核<sup>[18]</sup>。另一方面加入新型复合熔剂下相对于Al-5Ti-1B细化剂下的钛元素分布更加均匀, 根据双重核形核理论, 若仅由 $\text{TiB}_2$ 而无富裕的Ti则界面能较

大，难以异质形核<sup>[19]</sup>。因此晶粒细化剂形核颗粒越分散，其细化效果越好。图13a和图12a相比，没有出现较大的熔渣，因此该新型复合溶剂的净化效果较好。

### 2.2.3 力学性能测试与分析

加入不同晶粒细化剂合金的力学性能如图14所示，由图可知，加入新型复合溶剂与Al-5Ti-1B晶粒细

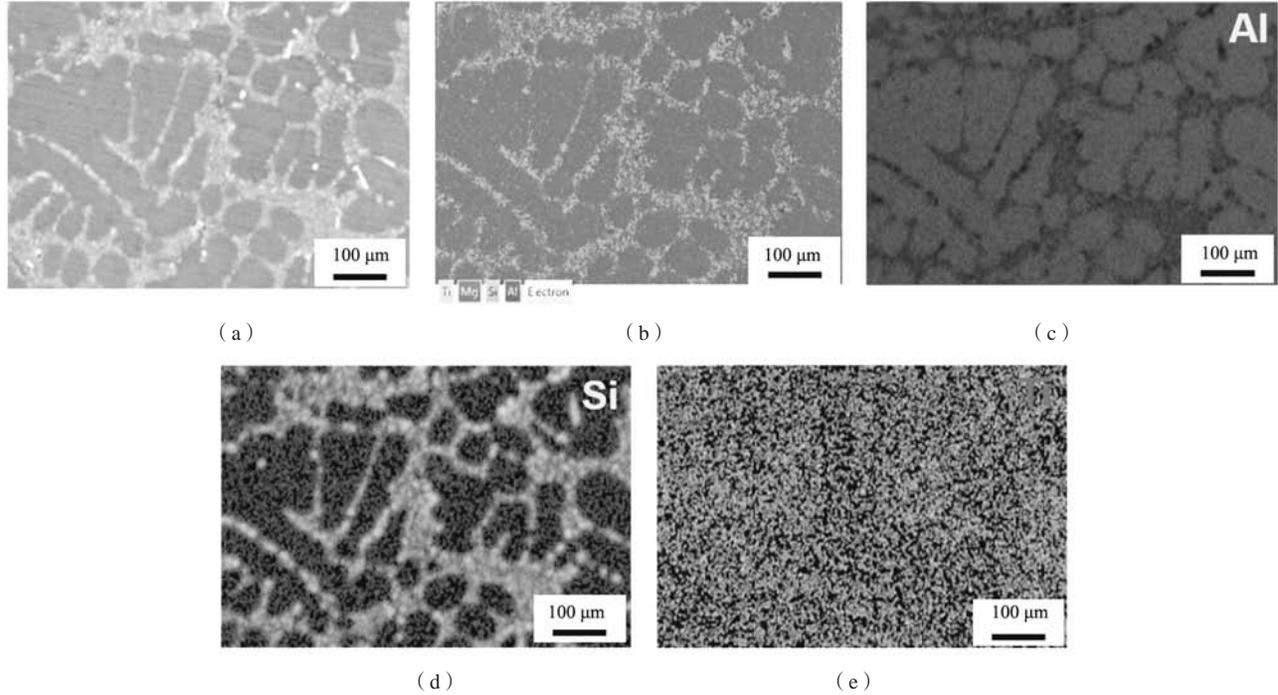


图12 加入Al-5Ti-1B晶粒细化剂后A356.2铝合金EDS面扫描

Fig. 12 EDS surface scanning of A356.2 aluminum alloy after adding Al-5Ti-1B grain refiner

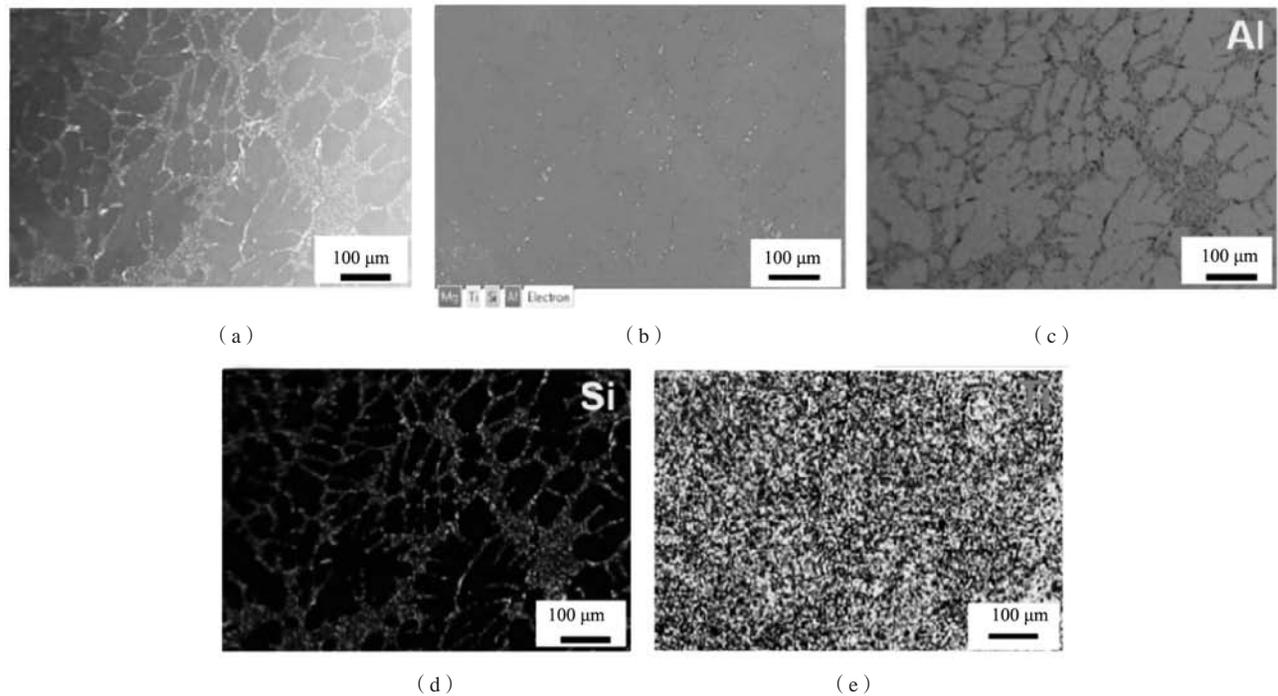


图13 加入0.1% 新型复合溶剂后A356.2铝合金EDS面扫描

Fig. 13 EDS surface scanning of A356.2 aluminum alloy after adding 0.1% new multi-function flux

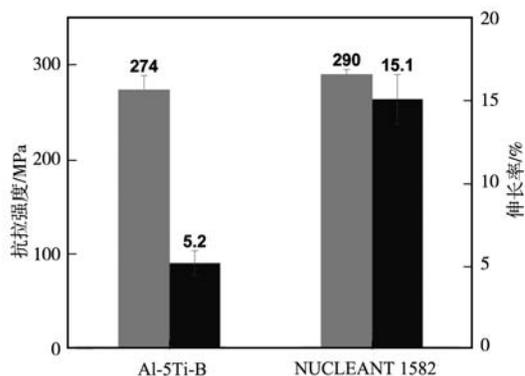


图14 不同晶粒细化剂对A356.2铸造铝合金力学性能的影响  
Fig. 14 Effects of different grain refiners on the mechanical properties of A356.2 cast aluminum alloy

化剂相比, 平均抗拉强度由274 MPa提升到290 MPa, 提升幅度约为5.8%; 但是伸长率较之前有明显提升, 由原来的5.2%提升到15.1%, 提高了190%。晶粒细化后, 晶界细化后导致晶界增多, 对位错产生的阻碍也就越大, 从而提高了材料的抗拉强度。韧性的提升主要与晶粒的细化程度提高有关, 从而阻碍位错滑移, 造成内部的位错塞积, 进一步地为相邻晶粒提供驱动力, 同时细小的晶粒可以更好地分散塑性变形, 减小

局部应力集中<sup>[20]</sup>。

### 3 结论

(1) 对于A356.2铸造铝合金, 加入新型复合熔剂能有效对A356.2进行细化, 加入0.05%效果明显, 随着加入量的提高, 细化效果随之提高, 当添加剂的加入量超过0.2%时, 细化效果改变不大。

(2) 相对于Al-5Ti-1B晶粒细化剂, 在新型复合熔剂同等Ti含量下可以获得更多的TiB<sub>2</sub>颗粒, 为 $\alpha$ -Al提供了更多的形核核心, 从而获得更好的细化效果, 提高了力学性能, 特别是改善了伸长率, 使伸长率提高了190%。

(3) 新型复合熔剂相对于Al-5Ti-1B细化剂的Si偏聚现象较轻, 并且钛元素的分布更加均匀, 更有利于晶粒细化。

(4) 新型复合熔剂具有细化和净化的铝熔体的双重效果, 相较于Al-5Ti-1B晶粒细化剂优化了铸造工艺, 提高了生产效率。

鸣谢: 本研究中承蒙上海大学李谦老师和中国科学院光学精密机械研究所胡斌博士对试验的帮助与支持, 在此致谢。

#### 参考文献:

- [1] 闫福成. 2022年中国汽车涂料工业发展回顾及2023年展望 [J]. 中国涂料, 2023, 38 (3): 1-12.
- [2] 陈琦. 首创证券: 2025年全球新能源车销量将达到1800万辆 [J]. 汽车与配件, 2021, 1313 (19): 43.
- [3] 何芳, 庄林忠, 何国元, 等. 汽车轮毂用A356铝合金合金化的研究进展 [J]. 铸造, 2021, 70 (4): 431-437.
- [4] SIGWORTH G K, KUHN T A. Grain refinement of aluminum casting alloys [J]. International Journal of Metalcasting, 2007, 1 (1): 31-40.
- [5] BALASUBRAMANIAN N, LANGDON T G. The strength-grain size relationship in ultrafine-grained metals [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47 (12): 5827-5838.
- [6] TERLINDE G, LUETJERING G. Influence of grain size and age-hardening on dislocation pile-ups and tensile fracture for a Ti-Al alloy [J]. Metallurgical Transactions A, 1982, 13 (7): 1283-1292.
- [7] MURTY B S, KORI S A, CHAKRABORTY M. Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying [J]. Metallurgical Reviews, 2002, 47 (1): 3-29.
- [8] 闫敬明, 黎平, 左孝青, 等. Al-Ti-B晶粒细化剂研究进展: 细化机理及第二相控制 [J]. 材料导报, 2020, 34 (9): 9152-9157.
- [9] 起华荣, 史庆南, 王效琪, 等. Al5Ti1B对A356合金流动性的影响 [J]. 铸造, 2009, 58 (5): 489-493.
- [10] 蔡郭生, 王笃雄. Al-5Ti-1B对铸造702A铝合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2013, 62 (5): 445-447.
- [11] 于占举, 申玉彬, 蔺文学, 等. 铝钛硼细化剂添加时间对A356铝合金中B元素吸收率的影响 [J]. 铸造技术, 2020, 41 (7): 633-636.
- [12] 黎阳. Al-Si 系铸造铝合金的细化剂设计及其抗毒化机理研究 [D]. 上海: 上海大学, 2019.
- [13] TIMELLI G, CAMICIA G, FERRARO S. Effect of grain refinement and cooling rate on the microstructure and mechanical properties of secondary Al-Si-Cu alloys [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23 (2): 611-621.
- [14] JOHNSON M, BACKERUD L, SIGWORTH G K. Study of the mechanism of grain refinement of aluminum after additions of Ti and B-containing master alloys [J]. Metallurgical Transactions A, 1993, 24: 481-491.
- [15] 张光曙, 朱丽娟, 艾永平. Al-Si-Mg铸造合金的原位拉伸试验研究 [J]. 铸造, 2023, 72 (7): 846-851.
- [16] DONG X, JI S. Si poisoning and promotion on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg cast alloys [J]. Journal of Materials

Science, 2018, 53 ( 10 ) : 7778-7792.

- [17] NOWAK M, BOLZON L, HARI BABU N. Grain refinement of Al-Si alloys by Nb-B inoculation. part I : concept development and effect on binary alloys [J]. Materials & Design, 2015, 66: 366-375.
- [18] LI Y, HU B LIU B, et al. Insight into Si poisoning on grain refinement of Al-Si/Al-5Ti-B system [J]. Acta Materialia, 2020, 187: 51-65.
- [19] HAN Y F, DAI Y B, SHU D, et al. First-principles calculations on the stability of Al/TiB<sub>2</sub> interface [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89 ( 14 ) : 144107.
- [20] 朱琳. 微量纳米晶调控铸造铝合金微观组织及室温和高温力学性能 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.

---

## Effect of New Refining/Purifying Multi-Function Flux on Microstructure and Properties of A356.2 Aluminum Alloy

ZHENG Yi-jian

(Vesuvius Foundry Technologies (Jiangsu) Co., Ltd., Changshu 215537, Jiangsu, China)

### Abstract:

In order to improve the mechanical properties of A356.2 cast aluminum alloy, a new multi-function flux (NUCLEANT 1582) was developed for the purification of aluminum alloy melt and its grain refinement simultaneously. The main component of the multi-function flux was an inorganic salt containing Ti and B elements. Through the first stage of research, it was found that when the addition amount was 0.05%, a significant refinement effect was obtained; with the increase of the amount of multi-function flux, the grain refinement effect of aluminum alloy increased. When the amount of multi-function flux was more than 0.2%, the refinement effect was leveling off. In the second stage, the new multi-function flux was compared with Al-5Ti-1B grain refiner. The results showed that the refinement effect of the new composite flux was 15% higher than that of Al-5Ti-1B refiner, the tensile strength increased by 5.8%, and the elongation increased by 190%. The grain refinement effect was improved without increasing the content of Ti element.

### Key words:

A356.2 aluminum alloy; grain refinement; new multi-function flux; mechanical properties

---