两种细化剂复合应用对 A356 铝合金组织和性能的影响

孙震兆[1]，李兴华[2]，刘春伟[2]，蒋永浩[2]，周仕勇[2]，李泽芝[1]，赵　平[1]

（1. 青岛科技大学材料科学与工程学院，山东青岛 266042；2. 山东鸿源新材料有限公司，山东淄博 256102）

摘要：采用一种新型的活性Ti细化剂与Al-5Ti-B细化剂复合处理A356铝合金熔体，研究两种细化剂复合应用对A356铝合金组织和性能的影响。结果表明：在添加Al-5Ti-B细化剂的基础上添加活性Ti细化剂能明显提高形核率，细化α-Al晶粒和改变共晶硅形貌。当添加1%Al-5Ti-B和0.04%活性Ti细化剂时，α-Al相由粗大树枝状转变为蔷薇状和近球状，共晶Si形貌由长针状及板片状变为球状和短棒状，使A356铝合金力学性能增强。添加1%Al-5Ti-B和0.04%活性Ti细化剂的A356铝合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别提升至313 MPa、263 MPa和12%。

关键词：活性Ti细化剂；Al-5Ti-B细化剂；A356铝合金；力学性能

随着国民经济的迅速发展，轻金属及其合金广泛应用于各行业[1]。A356铝合金作为亚共晶铝合金的典型代表，主要合金成分包括6%~7%的Si和0.3~0.6%的Mg，同时含有微量的Fe、Cu、Mn和Cr等元素，经过适当的变质处理与热处理工艺，A356合金展现出低密度、高比强度、优良的力学性能以及良好的铸造性和耐蚀性，因此在需要高强度与优异耐腐蚀性的轮毂，发动机缸体和制动组件等部件中备受青睐[2]。

未经变质处理的A356合金主要由粗大的初生α-Al和针片状的共晶Si组成。针片状的共晶Si沿枝晶间随机分布，割裂基体，在受到外加载荷时易产生裂纹，降低合金的力学性能。同时，粗大的α-Al也会在一定程度上降低合金的延展性和韧性[3]。因此如何细化初生α-Al和共晶Si的尺寸，改变共晶Si的形貌成为改善A356铝合金力学性能的关键。为达到提高力学性能的目的，许多变质剂和晶粒细化剂被开发和应用于A356合金的生产中。李亚龙等研究发现，在铝液中加入TiB_2颗粒，会阻碍α-Al晶粒和共晶Si长大，从而达到细化晶粒和共晶Si的作用，使其铸态复合材料力学性能得到提升[4]。何卫等研究发现，在A356铝合金中添加TiB_2不仅细化α-Al相，而且可以改变共晶Si的形态[5]。倪培相等研究发现，在Al中单独加入少量的Ti时，晶粒发生了明显的细化[6]。为研究不同种类细化剂对铝合金组织与性能的影响，本文对A356铝合金进行研究，讨论活性Ti细化剂和Al-5Ti-B细化剂复合添加对A356铝合金组织和力学性能的影响。

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

本次试验在A356合金中添加1%Al-5Ti-B细化剂的基础上再添加不同含量的活性Ti细化剂，制取的试棒化学成分要求如表1所示。

试验合金使用燃气式ACE-1000中频炉熔炼，每炉铝液560 kg。当A356铝锭溶化后，在温度达到710 ℃±5 ℃时加入Al-5Ti-B细化剂和活性Ti细化剂，活性Ti细化剂

作者简介：
孙震兆（2000–），男，硕士生，主要研究方向为先进金属材料的研究与开发。E-mail：1300768984@qq.com
通信作者：
赵平，男，副教授，硕士研究生导师。E-mail：zhaoping@qust.edu.cn

中图分类号：TG146.21；TG113
文献标识码：A
文章编号：1001-4977（2025）06-0759-08

基金项目：
山东省淄博市重点研发计划基金资助项目（编号：2021XCYF0010）；山东省科技型中小企业创新能力提升工程（2022TSGC2246，2024TSGC0319）。
收稿日期：
2024–10–31 收到初稿，
2024–12–09 收到修订稿。

表1 试样的化学成分
Tab. 1 Chemical composition of the specimen

w_B/%

Si	Mg	Ti	Sr	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
6.500~7.000	0.200~0.300	0.100~0.160	0.035~0.045	≤0.150	≤0.100	≤0.100	≤0.100	余量

外观为白色颗粒状粉末，非中间合金，Al-5Ti-B细化剂添加量为每炉铝液总量的1%，活性Ti细化剂分别加入2个熔化炉中，添加量为每炉次总量的0.02%和0.04%。

浇注试棒前采用商业购买精炼清渣颗粒和旋转除气工艺对铝合金液进行净化处理。具体操作为：将提前预热好的Al-5Ti-B细化剂按1%的比例加入到已经溶化的铝液中，保温除气3 min，此时取1号熔化炉中合金浇注1组试棒；在2号熔化炉中加入0.02%活性Ti细化剂，待细化剂反应并保温除气后，取2号熔化炉中合金浇注2组试棒；在3号熔化炉中加入0.04%活性Ti细化剂，待细化剂反应并保温除气后，取3号熔化炉中合金浇注3组试棒。浇注试棒过程中，提前预热试棒模具至380~450 ℃，浇注过程中要确保清除铝渣，避免夹杂物进入材料基体中。待试棒冷却后去除浇冒口，进行T6热处理[7]，工艺参数为在535 ℃±5 ℃温度下固溶120 min，后在40~80 ℃水中淬火，随后在180 ℃±5 ℃温度下时效100 min。具体试样编号和试验方法的对应关系见表2。

表2 试样编号和试验方法的对应关系表
Tab. 2 Correspondence table between specimen number and test method

样品分组	试样编号	试验方法
1组	1-1	铝锭+1%Al-5Ti-B
	1-2	
	1-3	
2组	2-1	铝锭+1%Al-5Ti-B+0.02%活性Ti
	2-2	
	2-3	
3组	3-1	铝锭+1%Al-5Ti-B+0.04%活性Ti
	3-2	
	3-3	

1.2 试验方法

从试棒取样并制备金相试样，如图1所示，使用ARLeasySpark1160全谱直读火花光谱仪对试样进行化学成分分析。将金相试样进行粗磨和细磨，在抛光机上进行抛光，最后用0.5%的HF溶液腐蚀试样。在ZEISSAxioLab.A1金相显微镜（OM）上观察其组织形貌。使用210HBS-3000数显布氏硬度计测试硬度。采用JSM-6700F扫描电子显微镜和能谱仪对微观组织、合金元素分布及拉伸断口形貌进行分析。加工试棒制取拉伸试样在GNT300电子式万能试验机上进行室温拉伸试验，试验条件为：加载位移速率2 mm/min，条件屈服强度使用引伸计测定，采用圆柱形试样，取样方向为纵向。

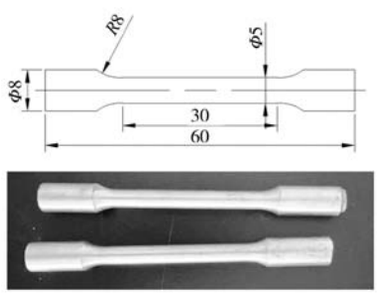


图1 拉伸试样示意图
Fig. 1 Schematic diagram of tensile specimen.

2 试验结果与讨论

2.1 化学成分分析

对活性Ti粉末进行XRD分析，结果如图2所示。由图2可知，活性Ti粉末主要由KBF_4、CaF_2和TiO_2组成。利用光谱仪对试棒进行化学成分检测，其化学成分如表3所示。由表3可知，1组试棒中元素Mg含量较低分别为0.270%、0.290%和0.280%；2组试棒中元素Mg含量升高，分别为0.310%、0.320%和0.290%；而3组试棒中的元素Mg含量为三组中最高，分别为0.350%、0.320%

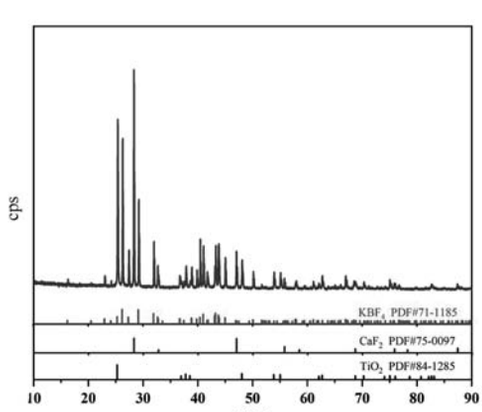


图2 活性Ti的XRD结果
Fig. 2 XRD results of active Ti

表3 试棒化学成分

Tab. 3 Chemical composition of test bars

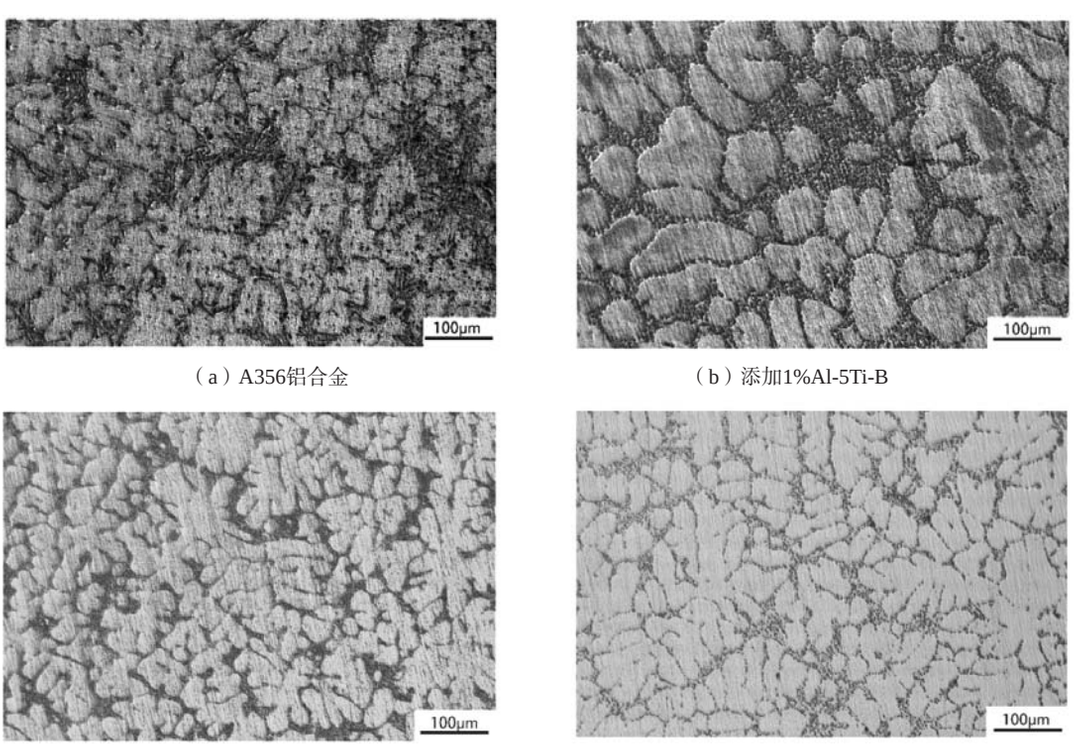
w_B/%

样品分组	样品编号	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Ti	Sn	Pb	Sr	Al
1组	1-1	6.890	0.270	0.120	0.020	0.022	0.190	< 0.001	< 0.002	0.067	余量
	1-2	6.880	0.290	0.100	0.018	0.022	0.200	< 0.001	< 0.002	0.066	余量
	1-3	6.850	0.280	0.110	0.021	0.021	0.210	< 0.001	< 0.002	0.055	余量
2组	2-1	6.690	0.310	0.110	0.018	0.020	0.190	< 0.001	< 0.002	0.043	余量
	2-2	6.700	0.320	0.120	0.019	0.021	0.200	< 0.001	< 0.002	0.048	余量
	2-3	6.750	0.290	0.100	0.020	0.022	0.180	< 0.001	< 0.002	0.040	余量
3组	3-1	6.740	0.350	0.100	0.019	0.019	0.200	< 0.001	< 0.002	0.046	余量
	3-2	6.720	0.320	0.110	0.018	0.020	0.190	< 0.001	< 0.002	0.045	余量
	3-3	6.780	0.330	0.100	0.021	0.021	0.200	< 0.001	< 0.002	0.044	余量

和0.330%；元素Mg含量逐渐升高的原因为熔炼炉炉衬材料中的MgO和活性Ti发生反应使元素Mg进入铝液，在A356铝合金中添加元素Mg能够与基体中的元素Si反应生成Mg_2Si，Mg_2Si在基体中能够阻碍位错的运动，从而提高合金的强度[8]。1组试棒中元素Sr含量为三组中最高分别为0.067%、0.066%和0.055%；2组试棒中元素Sr含量降低，分别为0.043%、0.048%和0.040%；3组试棒中的元素Sr含量与2组相差较小，分别为0.046%、0.045%和0.044%；元素Sr含量降低的原因为铝液中的元素Sr与活性Ti中的KBF_4和CaF_2发生置换反应。元素Sr添加后，Sr原子或Al_2Si_2Sr团簇会聚集在固液界面处，降低Si在某一方向的生长速率，从而减少长条状或针状共晶Si的出现[9]。但Sr添加过多会产生Sr中毒现象，反而会降低合金力学性能，同时Sr的加入会增加铝液中的含氢量，增加气孔和缩松等缺陷出现概率[10]。

2.2 微观组织分析

图3为A356铝合金添加1%Al-5Ti-B细化剂和不同含量活性Ti细化剂作用下的合金显微组织。由图可以



（a）A356铝合金　（b）添加1%Al-5Ti-B

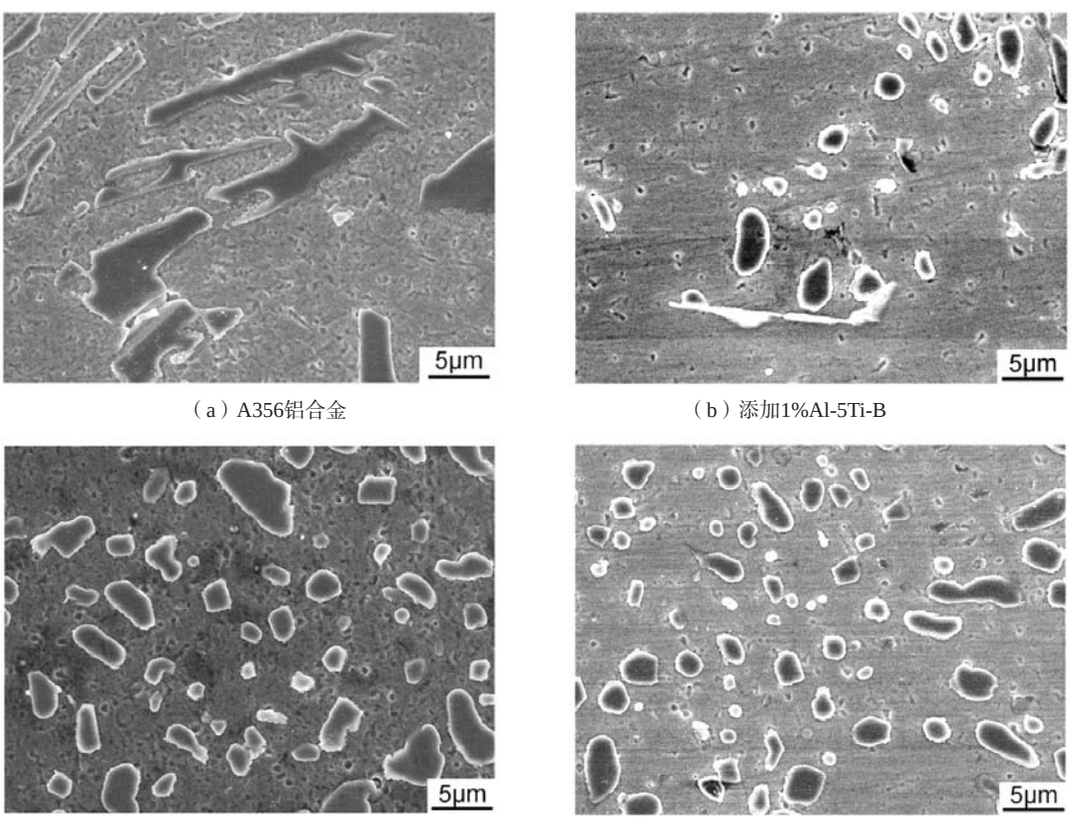
（c）添加1%Al-5Ti-B+0.02%活性Ti　（d）添加1%Al-5Ti-B+0.04%活性Ti

图3 不同处理条件下A356铝合金金相照片

Fig. 3 Metallographic pictures of A356 aluminium alloy under different raw material conditions

看出，未添加活性Ti和Al-5Ti-B时，合金呈粗大的初生α-Al相树枝晶的组织，二次枝晶的直径、长度及枝晶间距都比较大，见图3（a）。当加入1%的Al-5Ti-B后，合金中初生α-Al相尺寸和形态发生了较明显的变化，初生α-Al相由粗大树枝晶变为等轴晶和短树枝晶形态，尺寸减小，二次枝晶的长度也显著缩短和晶臂直径和枝晶间距有所缩短[11]，二次枝晶间距缩短为62 μm，见图3（b）。当加入0.020%的活性Ti后，合金中初生α-Al相变化更明显，同时出现了较多的蔷薇状α-Al相和少量较圆整的球形α-Al相，二次枝晶间距显著缩短至29.7 μm，见图3（c）。当加入1%的Al-5Ti-B和0.040%的活性Ti后，合金中出现了大量蔷薇状α-Al相和近球形α-Al相，初生α-Al相细化，树枝晶的数量减少，二次枝晶间距继续缩短至28.3 μm，见图3（d）。

图4为扫描电镜下A356铝合金添加1%Al-5Ti-B细化剂和不同含量活性Ti细化剂时共晶Si的组织形貌。可以看出，未添加变质剂的A356合金中，共晶Si呈粗大的长针状及板片状形态，这种形貌的共晶Si极易在其尖端处造成应力集中，从而削弱铸件的机械性能，见图4（a）。加入1%的Al-5Ti-B后，共晶Si相生长方式由粗大的针状或板条状形态转为短棒或细片状[12]，部分共晶Si仍然呈现块状形态，尺寸明显减小，见图4（b）。当加入0.020%的活性Ti和1%的Al-5Ti-B后，共晶Si的形态发生了更加显著的改变和细化，呈非常细小的短棒状和球状，并且弥散分布，这种形态细小和具有边缘钝化的共晶Si形貌，有利于A356铝合金力学性能的改善[13]，见图4（c）。当继续增加0.04%的活性Ti和1%的Al-5Ti-B后，共晶Si的形貌和尺寸进一步细化，球状共晶Si的比例提高，见图4（d）。



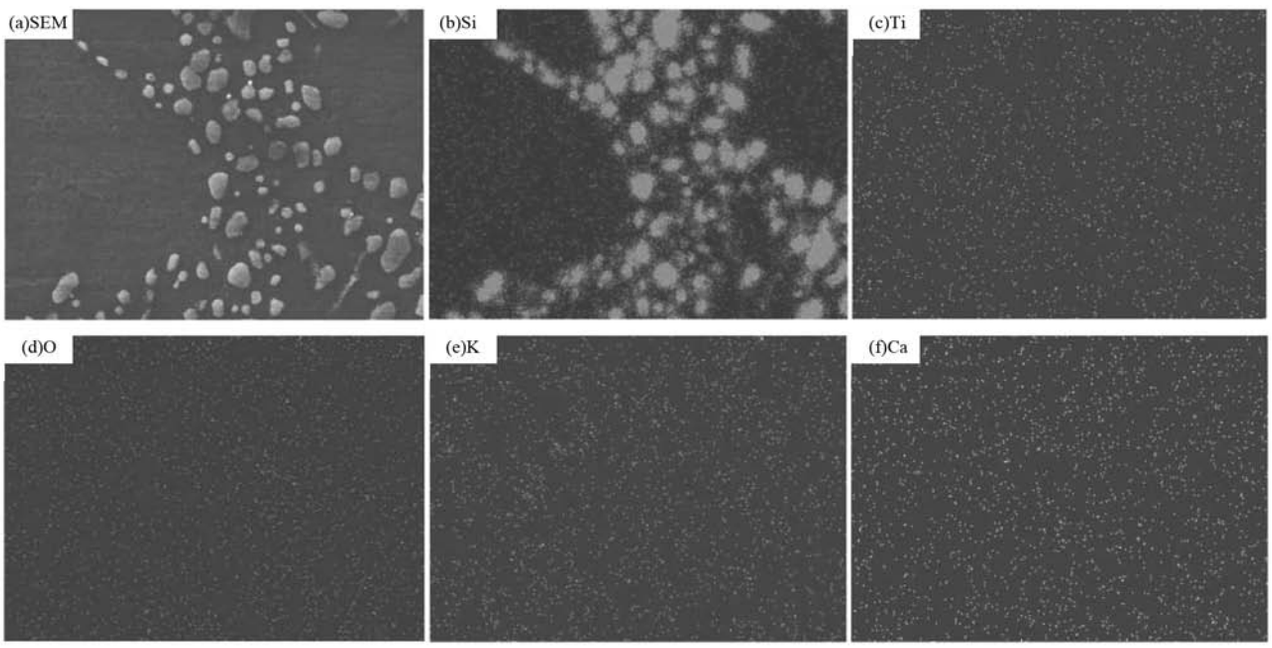
（a）A356铝合金　（b）添加1%Al-5Ti-B

（c）添加1%Al-5Ti-B+0.02%活性Ti　（d）添加1%Al-5Ti-B+0.04%活性Ti

图4　不同处理条件下A356铝合金SEM照片

Fig. 4 SEM images of A356 aluminium alloy under different raw material conditions

为观察添加1%Al-5Ti-B+0.040%活性Ti的A356铝合金中元素分布状态，对试棒3-3进行SEM选区面扫，结果如图5所示。从图5可以看出，A356铝合金中中Ti、O、K和Ca元素粒子弥散固溶于α-Al基体中，未产生单个元素的偏聚现象，表明Ti、O、K和Ca粒子不易在熔体中团聚沉淀而降低其细化能力。α-Al基体上分布的共晶Si相由Si和Al元素粒子掺杂而成，Si元素粒子大量偏聚在共晶Si相中。



（a）3-3的SEM；（b~f）3-3的元素分布

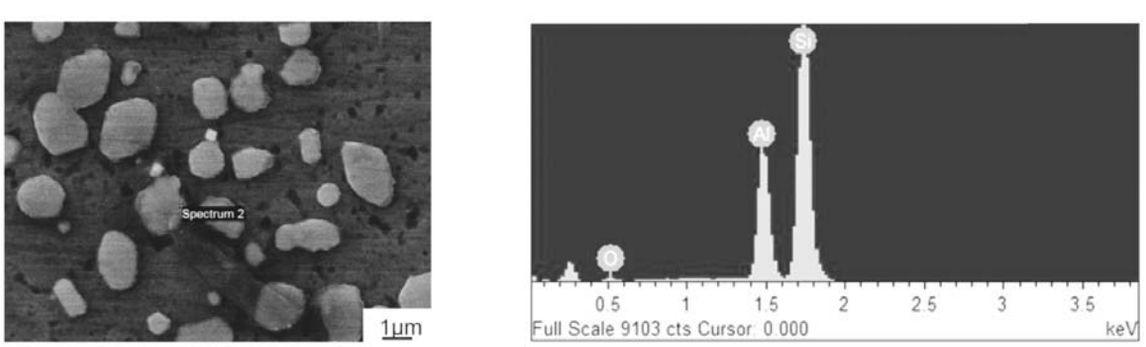
图5　试棒3-3的SEM和能谱分析

Fig. 5 SEM and energy spectrum analysis of 3-3

图6为添加1%Al-5Ti-B+0.04%活性Ti的A356铝合金中白色颗粒的SEM照片和EDS结果。由图6可知，细小的白色颗粒位于共晶Si和初生α-Al枝晶的界面处，主要成分是Al、O和Si。由EDS结果分析可得图5中的白色颗粒是原位γ-Al_2O_3颗粒。结合图5和图6的结果可以得出，添加活性Ti细化剂对A356铝合金进行细化变质处理时，活性Ti细化剂中的TiO_2与铝熔体反应原位生成了微纳米级的γ-Al_2O_3颗粒[14]。α-Al与其晶粒内部γ-Al_2O_3颗粒的位向关系表明γ-Al_2O_3可以用作异质形核位点来细化α-Al晶粒，同时熔体中γ-Al_2O_3吸附在Si相孪晶生长的凹角位置，有效地抑制了Si相的孪晶凹谷生长机制，从而使共晶硅变质细化。这一过程促使Si相的生长模式转变为各向同性，最终使得Si相颗粒的尺寸减小，并促进其形态向更加球形的方向发展[15]。Si与γ-Al_2O_3之间的晶格失配大约为3%，这使得γ-Al_2O_3能够充当Si形核的有效核心，从而在合金中起到细化Si相的作用。依据Orowan强化理论，当α-Al和Si相的尺寸减小且形态趋向规则化时，A356铝合金的力学性能将得到显著改善。此外，由反应生成的γ-Al_2O_3颗粒还可以作为增强相进一步提升合金的力学性能。

2.3　力学性能分析

对试棒进行力学性能检测，其抗拉强度、屈服强度和伸长率如图7所示。从图7中得出，未添加活性Ti



（a）共晶组织SEM　　（b）共晶组织EDS

图6　试棒3-3共晶组织的SEM和能谱分析

Fig. 6 SEM and energy spectrum analysis of bar 3-3 eutectic microstructure

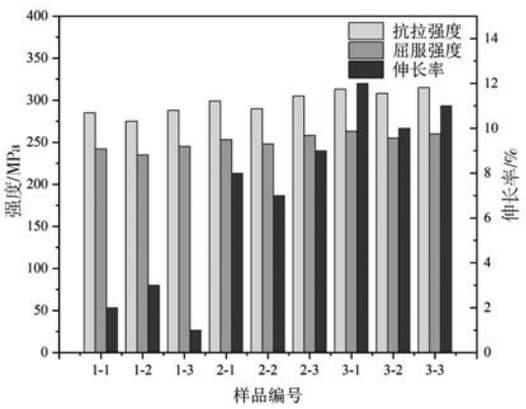


图7 试棒力学性能

Fig. 7 Mechanical properties of test bars

细化剂的1组试棒的抗拉强度、屈服强度和伸长率等力学性能较差，1组试棒的平均抗拉强度仅有288 MPa，平均屈服强度仅有245 MPa，平均伸长率仅有2%。添加0.020%的活性Ti后，2组试棒的力学性能明显得到提升，2组试棒的平均抗拉强度达到298 Mpa，平均屈服强度达到253 MPa，平均伸长率达到8%。继续添加活性Ti含量后，3组试棒的力学性能继续提升，添加0.040%的活性Ti后的3组试棒的平均抗拉强度提升至312 MPa，平均屈服强度提升至259 MPa，平均伸长率提升至11%。相较于1组试棒，抗拉强度提升了8%，屈服强度提升了5%，伸长率提升了近5倍。综上，活性Ti细化剂的添加可以在提高强度的同时提高韧性，即在增强A356铝合金的抗拉强度和屈服强度的同时大幅提高伸长率，这证明添加活性Ti细化剂可以使A356铝合金发生晶粒细化。

对试棒进行硬度测试，其硬度值如表4所示。由表4可知，未添加活性Ti细化剂的1组试棒的平均硬度仅为HBW89，添加0.020%活性Ti的2组试棒的硬度略微提升至HBW96，添加0.040%活性Ti的3组试棒，其平均硬度提升至HBW100，相较于1组试棒的硬度提升了12%。综上可见，活性Ti细化剂的加入对A356铝合金起到一定的强化效果，使铝合金试棒获得更高的硬度。

表4 试棒布氏硬度

Tab. 4 Brinell hardness of test bars

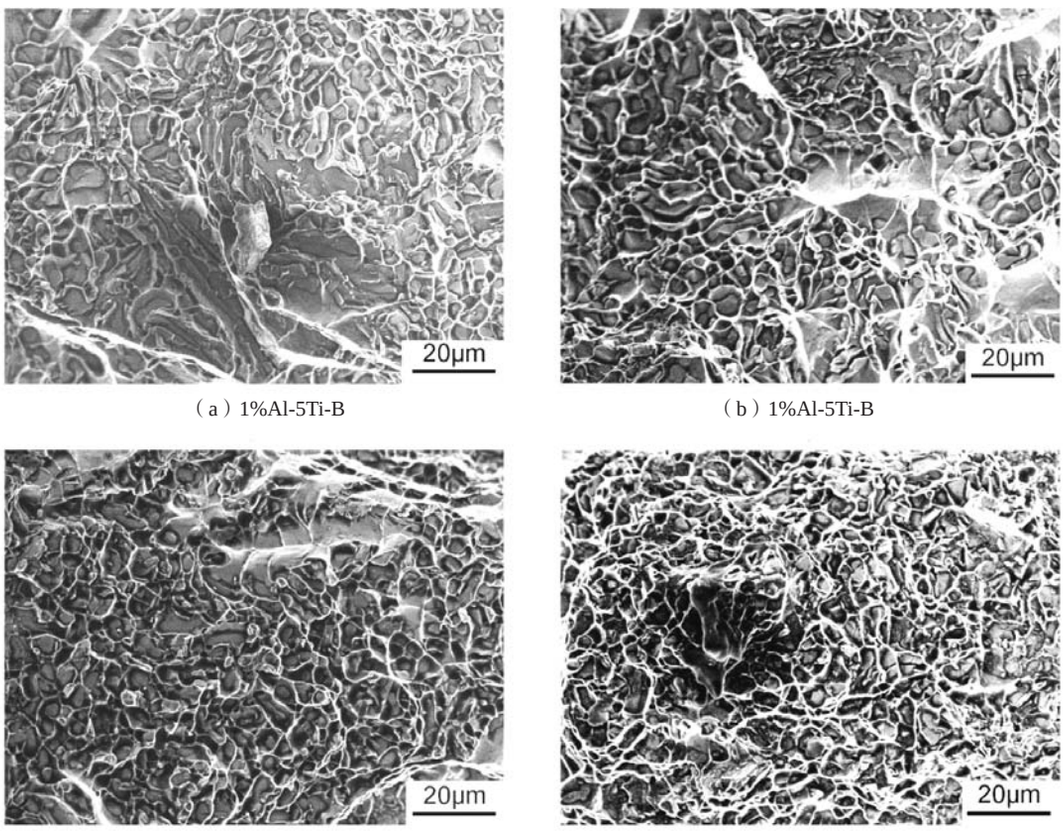
样品分组	样品编号	Si	硬度值HBW						平均值
	1-1	6.890	88	95	85	93	85	89	
1组	1-2	6.880	86	97	88	90	86	85	89
	1-3	6.850	89	95	90	85	88	86	
	2-1	6.690	95	95	97	92	97	99	
2组	2-2	6.700	97	98	95	93	97	100	96
	2-3	6.750	99	96	97	93	92	104	
	3-1	6.740	108	102	104	92	94	99	
3组	3-2	6.720	110	113	98	96	99	94	100
	3-3	6.780	99	115	99	94	95	92	

2.4 断口分析

图8为添加1%Al-5Ti-B细化剂和不同含量活性Ti细化剂后的A356铝合金试样的断口微观形貌。铝基体是面心立方结构，因此基本不存在解理断裂形式，A356铝合金经时效处理后的拉伸断裂形式一般以滑移带开裂、沿晶开裂和韧窝性开裂三种方式为主[16]。图8（a）和（b）为1%Al-5Ti-B试棒的断口形貌，断口上分布着撕裂楞、少量的韧窝和较为平坦的准解理面，因此可以认定其断裂过程中脆性断裂和塑性断裂同时发生，其断口为典型的混合型断口。图8（c）为0.020%活性Ti+1%Al-5Ti-B试棒的断口形貌，断口表面韧窝数量增加，韧窝底部能够明显的观察到第二相粒子，同时断口表面存在较为平坦的准解理面，因此其断裂以准解理断裂为主要方式[17]。图8（d）为0.040%活性Ti+1%Al-5Ti-B试棒的断口形貌，断口韧窝数量增加且尺寸缩小，分布均匀且细密，在拉伸过程中整个体积范围内都表现出一致的塑性行为[18]。综上，添加活性Ti能改善A356铝合金的塑性，从而提高其抗拉强度和伸长率等力学性能。

3 结论

（1）添加活性Ti细化剂能够优化初生α-Al相的形态并改变共晶硅形貌，使初生α-Al相由粗大树枝晶转变为等轴晶和短树枝晶形态，共晶Si由长针状及板片状转变为短棒状和球状。



（a）1%Al-5Ti-B　（b）1%Al-5Ti-B

（c）1%Al-5Ti-B+0.02%活性Ti　（d）1%Al-5Ti-B+0.04%活性Ti

图8　拉伸断口形貌

Fig. 8 Tensile fracture morphology

（2）添加活性Ti细化剂能够改善A356铝合金的力学性能，添加0.04%的活性Ti和1%的Al-5Ti-B后，A356铝合金试棒抗拉强度从283 MPa提升至312 MPa，屈服强度从241 MPa提升至259 MPa，断后伸长率从2%提升至11%，硬度从HBW89提升至HBW100。

（3）活性Ti细化剂中的TiO_2与铝基体反生成的γ-Al_2O_3颗粒可以作为异质形核核心，从而细化α-Al晶粒，同时γ-Al_2O_3颗粒能够促使Si相各向同性生长，从而改变共晶Si形貌。

（4）添加活性Ti细化剂可以改善A356铝合金的塑性，未添加活性Ti的A356铝合金试棒断裂方式为准解理断裂，经过活性Ti处理后的A356铝合金试棒塑性改善。

参考文献：

[1] 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.

[2] 杨彬，高平，赵宝荣，等. 混合稀土及热处理对A356合金组织与性能的影响 [J]. 机械工程材料，2006（4）：68–69.

[3] 杜青春，臧立根，董艳宾. 稀土元素变质A356铝合金的研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金，2020，40（2）：152–155.

[4] 李亚龙，刘志伟，董志武，等. TiB_2颗粒增强A356复合材料的组织及力学性能研究 [J]. 特种铸造及有色合金，2024，44（10）：1326–1332.

[5] 何卫，王利民，马恒，等. TiO_2变质对A356铝合金微观组织的影响 [J]. 热加工工艺，2024，53（19）：87–92.

[6] 倪培相，邢毅，孙军，等. Ti、Sc、Zr联合添加对7005铝合金组织和性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金，2023，43（4）：554–559.

[7] 吴嘉，杨昭，范纲衍，等. T6热处理与焊接顺序对A356铝合金搅拌摩擦焊接头组织和力学性能的影响 [J]. 矿冶工程，2023，43（6）：157–161.

[8] 徐远财，李广宇，蒋文明，等. Mg、Ce、Sr复合微合金化对A356铝合金组织和性能的影响 [J]. 铸造，2023，72（9）：1147–1151.

[9] 冯炜光，张艺杰，孙彦华，等. 复合添加Y/Sr对A356铝合金铸态组织影响研究 [J]. 云南冶金，2023，52（3）：91–97.
[10] 孙彦华，张艺杰，杜景红，等. Sr、Y复合添加对A356铝合金组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺，2023，52（17）：48–51.
[11] 吴恺威，雍学超. La和Al-Si-Ti-B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，2021，44（9）：1271–1276.
[12] 孙晓斌，张乐，陈彦玫，等. 稀土Y及AI-Si-Ti-B细化剂复合添加对A356铝合金组织和力学性能的影响 [J]. 内蒙古科技大学学报，2024，43（2）：119–122.
[13] 张超群，杨子旋，彭文飞，等. 共晶Si形貌对A356铝合金动态、准静态压缩力学性能及氢脆的影响 [J]. 材料导报，2023，37（S1）：414–419.
[14] 刘罗. 原位（TiB_2、ZrB_2）颗粒增强A356铝合金的组织与性能研究 [D]. 西安：西安工业大学，2023.
[15] 牟姝好. 原位纳米Al_2O_3颗粒增强A356铝基复合材料的制备及挤压铸造的研究 [D]. 镇江：江苏大学，2020.
[16] 张新梅，郝丽华，蒋大鸣，等. Al-Mg-Si合金拉伸断口研究 [J]. 材料工程，1996（5）：35–36.
[17] 孙亮，罗佳. 铸造A356铝合金的拉伸性能与断口分析 [J]. 现代制造技术与装备，2017（4）：75–76.
[18] 刘晓山，何国求，范宋杰. A356铸造铝合金的单轴疲劳特性及断口分析 [J]. 金属功能材料，2008（4）：34–37.

Effect of the Composite Application of Two Refining Agents on the Microstructure and Properties of A356 Aluminium Alloy

SUN Zhen-zhao[1], LI Xing-hua[2], LIU Chun-wei[2], JIANG Yong-hao[2], ZHOU Shi-yong[2], LI Ze-zhi[1], ZHAO Ping[1]
(1. School of Materials Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, Shandong, China; 2. Shandong Hongyuan New Materials Co., Ltd., Zibo 256102, Shandong, China)

Abstract:
A new type of active Ti refining agent and Al-5Ti-B refining agent composite treatment of A356 aluminium alloy melt were used to study the two refining agent composite application of A356 aluminium alloy microstructure and properties of the impact. The results showed that adding active Ti refining agent on the basis of adding Al-5Ti-B refining agent could obviously improve the nucleation rate, refine α-Al grains and change the eutectic Si morphology. When adding 1% Al-5Ti-B and 0.04% active Ti refining agent, the α-Al phase was transformed from coarse dendritic to rosaceous and near-spherical, and eutectic Si morphology was changed from long-needle and plate sheet to sphere and short rod. The mechanical properties of A356 aluminium alloy were enhanced. The tensile strength, yield strength and elongation of A356 aluminium alloy with 1% Al-5Ti-B and 0.04% active Ti refiner were increased to 313 MPa, 263 MPa and 12%, respectively.

Key words:
activated Ti refiner; Al-5Ti-B refiner; A356 aluminium alloy; mechanical properties

（编辑：刘东辉，ldh@foundryworld.com）