

# 新型 Al-P-N 晶种合金及其对过共晶 Al-Si 系合金组织和性能的影响

李 阳<sup>1</sup>, 武玉英<sup>1</sup>, 孟凡超<sup>1</sup>, 孙谦谦<sup>2</sup>, 赵 硕<sup>1</sup>, 刘相法<sup>1</sup>

(1. 山东大学 材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 山东济南 250061;

2. 山东吕美熔体技术有限公司, 山东济南 250061)

**摘要:** 研究了Al-P-N晶种合金及其对过Al-Si合金组织和性能的影响。结果表明: AIP和AlN粒子在Al-P-N晶种合金中形成, AlN粒子存在于AIP粒子的周围, 因此抑制了AIP粒子的长大, 使AIP得到了细化。与Al-P合金相比, Al-P-N合金中AIP粒子数目多、尺寸小, 从而提高了Al-Si熔体对P的吸收率。过共晶Al-Si合金经Al-P-N合金细化, 可以减少P的添加量达到与Al-P合金相同的细化效果, 且室温极限拉伸性能得到显著提高。在提高P吸收率的基础上, 提出了Al-Si熔体中AlN粒子对P原子的吸附模型。

**关键词:** Al-Si合金; AIP; 晶种合金; 细化; 异质形核

作者简介:

李 阳 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事晶种合金的优化及铝硅合金的高效磷变质的研究。E-mail: liyangsdu@163.com

通讯作者:

武玉英, 女, 副教授, 博士。E-mail: wyy532001@163.com

中图分类号: TG292; TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2019) 06-0585-08

基金项目:

山东省自然科学基金 (ZR201702200041); 山东大学青年学者未来计划; 国家自然科学基金 (51731007)。

收稿日期:

2019-03-09 收到初稿, 2019-04-11 收到修订稿。

AIP相和初晶Si相具有相似的晶体结构。根据界面共格理论, AIP相可以作为初晶Si相的异质形核衬底, 从而在近共晶Al-Si合金中起到促进初晶Si析出的作用, 在过共晶Al-Si合金中起到细化初晶Si的作用<sup>[1-6]</sup>。近年来, Al-Si合金因密度低、强度高、耐磨性好、热膨胀系数小被广泛应用于活塞合金中。Al-Si合金的性能主要取决于初晶Si的形貌、尺寸和分布, 故控制初晶硅的尺寸对于控制Al-Si合金的性能具有重要的意义<sup>[7-8]</sup>。自1933年德国鲁奇 (Lurgi) 公司的R. Sterner-Rainer<sup>[9]</sup>发现用PCl<sub>3</sub>加入到Al-Si熔体中, 可以使含Si量在5%~40%的Al-Si合金更耐磨以来, 向熔体中引入P经历了添加赤磷、磷盐和Cu-P中间合金, 一直发展到今天通过添加Al-P晶种合金的方式向Al-Si熔体中引入P<sup>[10-15]</sup>。Al-P合金加入到铝熔体后产生大量的AIP粒子, 促进了初晶硅的形核, 因此被称为Al-P晶种合金。该晶种合金不仅变质效果稳定, 加入方式简单, 而且不会产生P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>等有害气体, 极大地改善了生产环境。但是, 目前在Al-P晶种合金的应用中, 发现Al-P晶种合金加入到Al-Si熔体中后会降低熔体的流动性, 从而出现变质不足、铝液发粘等情况, 最终导致活塞的充型能力不足。其主要原因可能是向Al-Si熔体中加入Al-P合金后, 活塞合金熔体中存在较大尺度的AIP颗粒团, 并且这个颗粒团吸附能力很强, 从而增加了熔体的粘度。为了改善这一缺陷, 可行的办法是减小熔体中AIP粒子的尺寸。研究发现, 在Al-P晶种合金的制备过程中引入AlN粒子可以减小AIP的尺寸, 加入AlN粒子的这种新型Al-P-N晶种合金对Al-Si合金的组织 and 性能有何影响以及AlN的作用机制现在还不太清楚。

本文研究了AlN粒子对Al-P合金的影响以及Al-P-N晶种合金对过共晶Al-Si合金组织和性能的影响。同时比较了Al-P合金和Al-P-N合金对过共晶Al-Si合金的细化效果。

## 1 试验材料与方法

试验材料为A390合金, 采用高纯铝 (5N)、高纯硅 (5N)、工业纯镁 (99.97%)、电解铜 (5N) 为原料, 在25 kW中频感应炉中熔炼而成。经SPECTROMAX光谱仪测定, 其化学成分为: 17.80% Si、4.19% Cu、0.48% Mg、

0.13%Fe, 余量为Al。对于晶粒细化试验, 不同试验中添加晶种合金的种类和数量在表1中列出。将配好的A390合金置于5 kW的电阻炉中重熔, 并在780 °C保温15 min。待熔体稳定后, 加入 $C_2Cl_6$  (加入量0.5%) 进行除气除渣处理。电阻炉的温度由热电偶测量, 熔体温度由手持K型热电偶测量以最大限度地减少误差。继续保温15 min, 向熔体中加入Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 0.5, 1, 2$ ) 晶种合金 (加入量: 0.45%、0.35%和0.20%), 充分搅拌进行细化处理。取未做处理的A390合金作为对照组。继续保温15 min后, 一部分熔体浇注到矩形铸铁模具中, 尺寸为70 mm × 35 mm × 200 mm; 另一部分浇注到抗拉试棒模具中, 所用模具在浇注前均预热至200 °C。将Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 2$ ) 合金置于玻璃管中通过高频感应炉熔化, 随后浇到快速旋转的铜轮 (1 000 r/min) 上快速凝固, 得到厚度约为20  $\mu\text{m}$ 、宽度约为2 mm的Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 2$ ) 条带。试验中所用晶种合金均由山东吕美熔体技术有限公司提供。

本试验中所有的样品均进行T6热处理, 工艺为: 510 °C固溶2 h, 180 °C时效8 h。合金的微观组织用光学显微镜 (MX-2005C, HIROX, 日本) 和场发射扫描电子显微镜 (FESEM, SU-70, 日本) 观察, 并进行EDS分析合金中相的化学元素组成。在电子万能拉伸试验机 (CMT700) 中测量拉伸强度, 加载速率为2 mm/min, 用于拉伸试验的样品均加工成长棒状。伸

表1 晶粒细化试验所用的晶种合金种类和添加量  
Table 1 Type of Al-P-N seed crystal alloy and its addition amount in A390

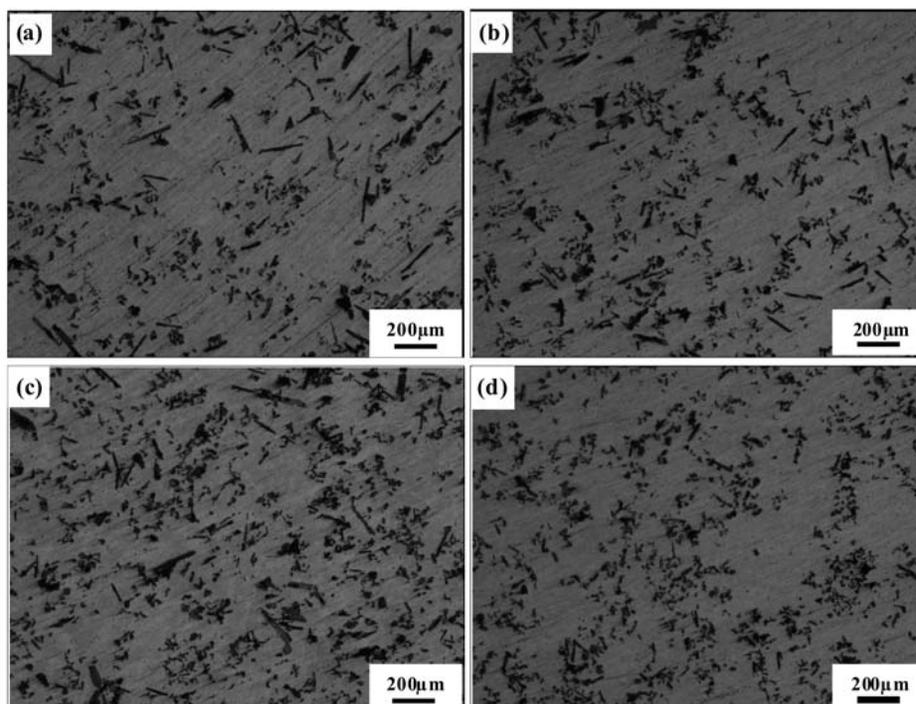
合金编号	晶种合金添加种类	晶种合金添加量/%
1	Al-4.5P	0.45
2	Al-4.5P-0.5AlN	0.45
3	Al-4.5P-1AlN	0.45
4	Al-4.5P-2AlN	0.45
5	Al-4.5P	0.35
6	Al-4.5P-2AlN	0.35
7	Al-4.5P	0.20
8	Al-4.5P-2AlN	0.20
9	未细化	0

长率通过固定在标距长度范围内的刀口伸长计测量。初晶硅的平均晶粒尺寸用软件Image J统计, 至少统计6张照片。利用光谱仪 (SPECTRO, 德国) 测量P的吸收量。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 0.5, 1, 2$ ) 晶种合金组织

图1a为Al-4.5P晶种合金的微观组织照片, 其中黑色的相即为AlP粒子, 黑色是由于AlP被氧化造成的。将AlN粒子加入到Al-P合金中后, AlP粒子的尺寸变



(a)  $x=0$ ; (b)  $x=0.5$ ; (c)  $x=1$ ; (d)  $x=2$

图1 Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 0.5, 1, 2$ ) 晶种合金的微观组织。

Fig. 1 Microstructures of Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 0.5, 1, 2$ ) crystal seed alloys

小,如图1b-d所示。图1a-d分别为Al-4.5P、Al-4.5P-0.5AlN、Al-4.5P-1AlN和Al-4.5P-2AlN晶种合金的微观组织,从图中可以看出,随着AlN加入量的提高,AIP粒子的尺寸逐渐减小。图2为对Al-P合金中AIP的EDS分析,发现尺寸大约为1~2 μm且富含Al、N和O元素的亮白色物相分布于AIP粒子的周围。经过分析,这种亮白色的物相是AlN, O元素的存在是由于在制样的过程中AIP发生了水解。EDS分析结果中Mg元素的存在是由于抛光过程中残留的MgO。图3为Al-P合金条带的微观组织,其中白色的粒子为AIP粒子,暗灰色基体为γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜,AIP易在γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜上形核<sup>[6]</sup>。通过对比图3a和b可以清楚的看出,向Al-P合金中添加AlN可以使较大尺寸AIP粒子的尺寸减小,并使其分布更加均匀。AlN粒子对P原子的吸附及AlN的作用机制如图4所示,在Al-P熔体中存在着AlN粒子,为了减小界面能,P原子倾向于聚集在AlN粒子附近,实现了AlN粒子对P原子的吸附。在Al-P合金的制备过程中添加AlN粒子,AlN首先会吸附熔体中的P原子来降低界面能,待AIP形成后它会依附在AIP粒子的周围,在液固界面前富集,一方面抑制了AIP粒子的进一步长大,从而减少AIP粒子的尺寸,同时改善了AIP的分布状态。

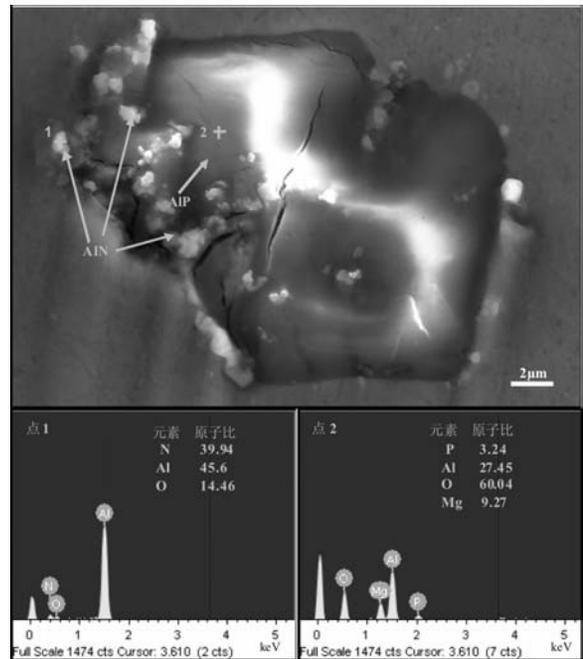
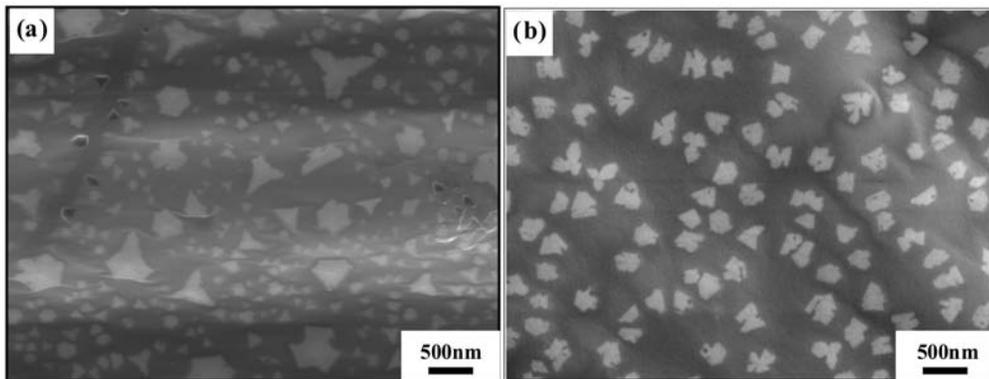


图2 黑色物相和亮白色物相的EDS分析  
Fig. 2 EDS analysis of bright white phase and black phase



(a) x=0 (b) x=2

图3 Al-4.5P-xAlN (x=0, 2)合金带表面的微观组织  
Fig. 3 Microstructure of Al-4.5P-xAlN (x=0, 2) alloy ribbon air-side surface

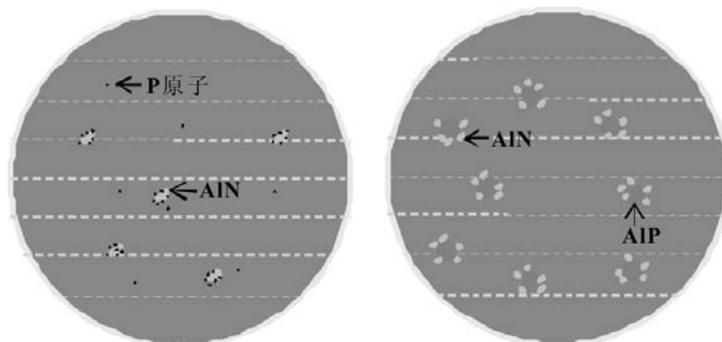


图4 AlN粒子对P原子的吸附模型及AlN粒子的作用机理

Fig. 4 The absorption model of AlN particles absorption P atomic and schematic of the action mechanism in Al-P alloy

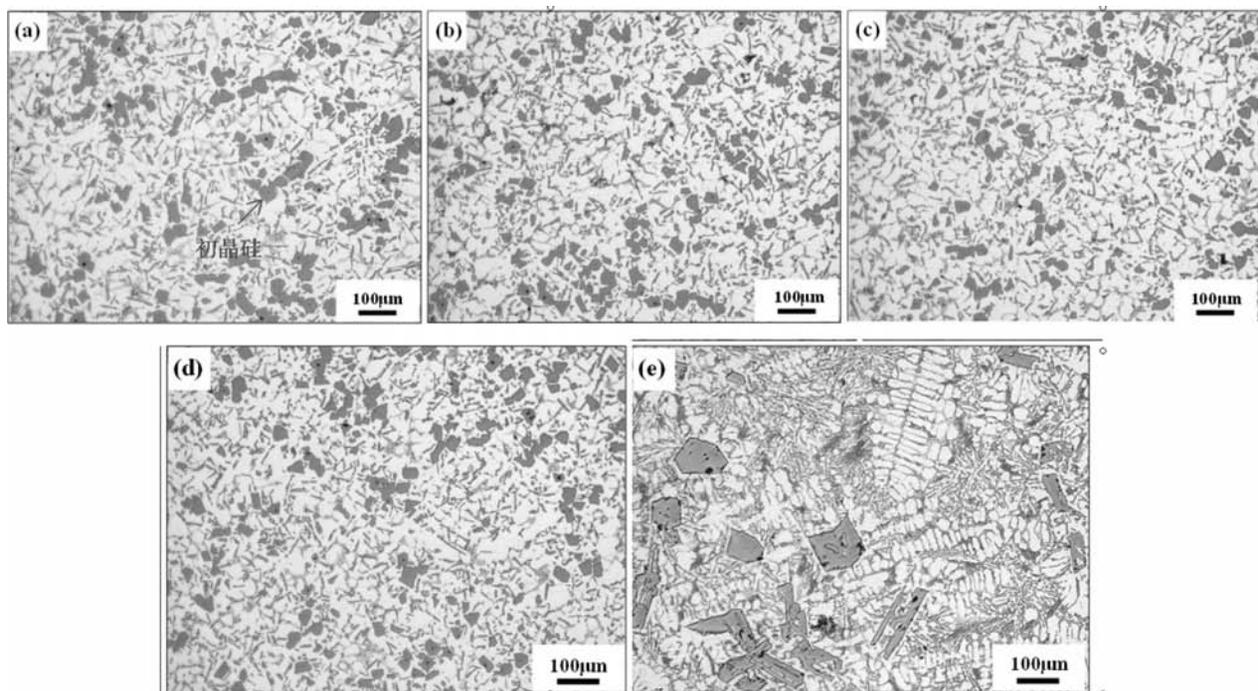
## 2.2 Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 0.5, 1, 2$ ) 晶种合金的细化效果

图5为A390合金未细化(图5e)和经Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 0.5, 1, 2$ )晶种合金细化后的微观组织,晶种合金的添加量为熔体质量的0.45% (即P的添加量约为 $200 \times 10^{-6}$ )。未细化的A390合金中初晶硅的尺寸很大,平均晶粒尺寸大约为 $122 \mu\text{m}$ ,且棱角明显,如图5e所示。图5a为经Al-4.5P合金细化后的组织,可以看出初晶硅的晶粒尺寸相对来说比较大,而且比较聚集。图5b-d为A390合金分别经Al-4.5P-0.5AlN、Al-4.5P-1AlN和Al-4.5P-2AlN合金细化后的组织。表2列出A390合金经Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 0.5, 1, 2$ )合金细化后初晶硅的平均晶粒尺寸和熔体对P的吸收率。经分析,向铝熔体中加入Al-P合金,随着Al-P合金中AlN含量的增加,初晶硅的平均晶粒尺寸减小,P的吸收率提高,同时初晶硅的分布得到改善。经Al-4.5P合金细化后,初晶硅的平均晶粒尺寸大约为 $41 \mu\text{m}$ ,P的吸收率大约为29.7%。当晶种合金中AlN的含量从0增加到2%时,初晶硅的平均晶粒尺寸从 $41 \mu\text{m}$ 减小到 $30 \mu\text{m}$ ;P的吸收率从29.7%增加到37%。另外,在组织中发现AlP粒子作为初晶硅的异质形核衬底,如图6所示。图7为AlP粒子在铝熔体中的作用机理。早期研究发现,由于AlP和初晶硅具有相同的晶体结构(fcc)和相似的晶

格参数,所以AlP可以作为初晶硅的异质形核衬底促进初晶硅的形核<sup>[1-6, 16-20]</sup>。当AlN加入到Al-4.5P合金中后,由于AlN依附在AlP粒子的周围,阻碍AlP粒子的进一步长大,使其数目增多尺寸减小。所以铝熔体中初晶硅的异质形核点增多,进而提高了Al-P合金的细化效果。

## 2.3 Al-4.5P和Al-4.5P-2AlN晶种合金对A390合金细化效果及力学性能的影响

图8和图9为A390合金经Al-4.5P和Al-4.5P-2AlN合金细化后的显微组织照片。其中,图8a为A390合金经Al-4.5P晶种合金细化后的显微组织,初晶硅的平均晶粒尺寸大约为 $42 \mu\text{m}$ ,P的吸收率为28.0%;图8b为A390合金经Al-4.5P-2AlN晶种合金细化后的显微组织,初晶硅的平均晶粒尺寸大约为 $32 \mu\text{m}$ ,P的吸收率为42.7%。晶种合金的添加量为熔体质量的0.35%,即P的添加量大约为 $150 \times 10^{-6}$ 。与Al-4.5P合金的细化效果相比,A390合金经Al-4.5P-2AlN细化后,初晶硅的平均晶粒尺寸减小约23.8%,P的吸收率提高约52.4%。当添加晶种合金的量降低至熔体质量的0.20% (即P的添加量为 $90 \times 10^{-6}$ )时,具有相同的效果。图9a为A390合金经0.20%Al-4.5P合金细化后的显微组织,初晶硅的平均晶粒尺寸大约为 $52 \mu\text{m}$ ;添加相同量的Al-4.5P-2AlN合金初晶硅的平均晶粒尺寸减小到 $39 \mu\text{m}$ ,如图9b所示。



(a) Al-4.5P 合金; (b) Al-4.5P-0.5AlN 合金; (c) Al-4.5P-1AlN 合金; (d) Al-4.5P-2AlN 合金; (e) 未添加

晶种合金的A390合金经不同晶种合金细化后的微观组织,晶种合金的添加量为熔体质量的0.45%

Fig. 5 Microstructures of A390 alloys refined by Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 0.5, 1, 2$ ) with addition of 0.45%

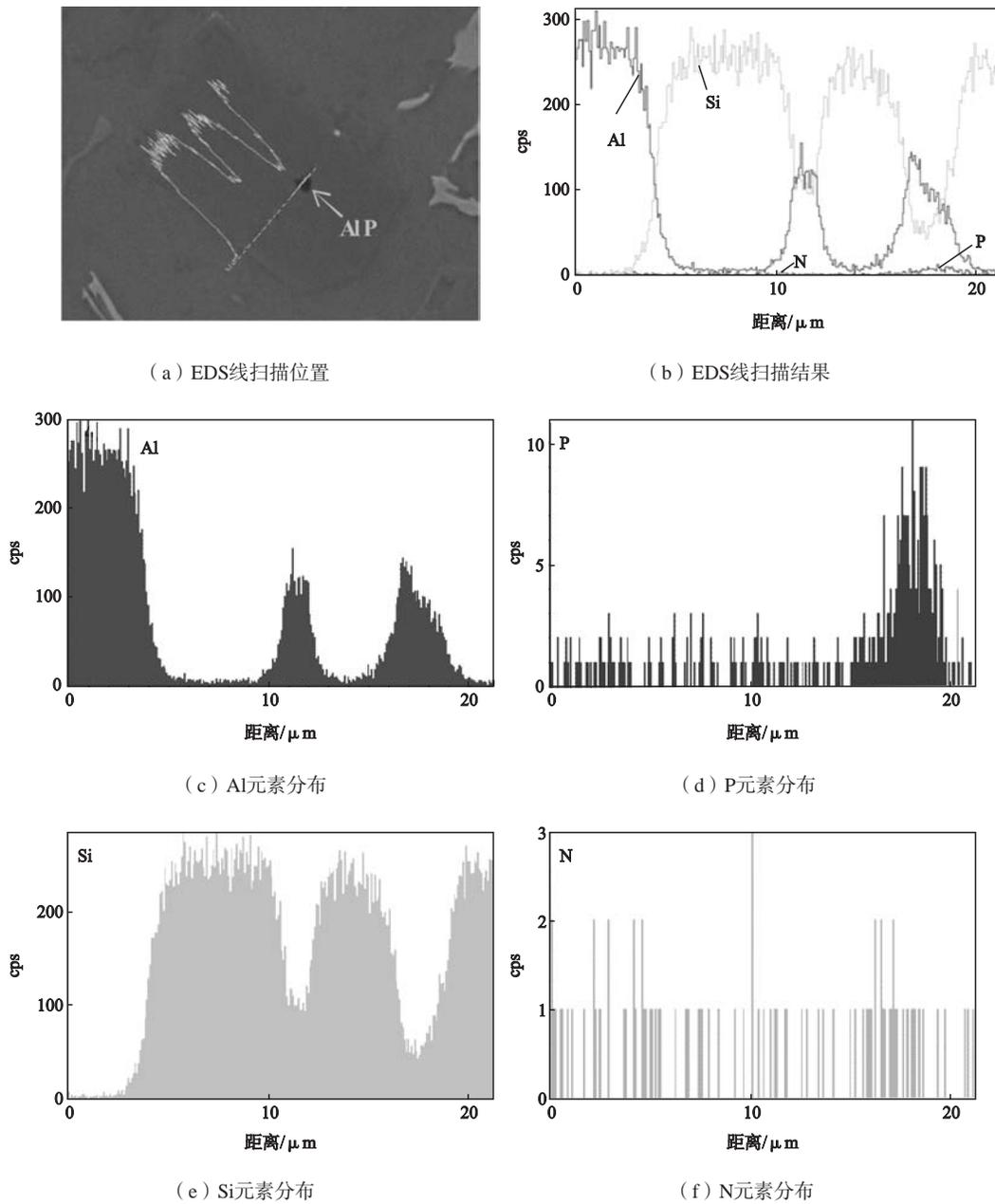


图6 初晶硅中心黑色相的线扫描分析

Fig. 6 EDS analysis of black phase in the center of a primary Si grain

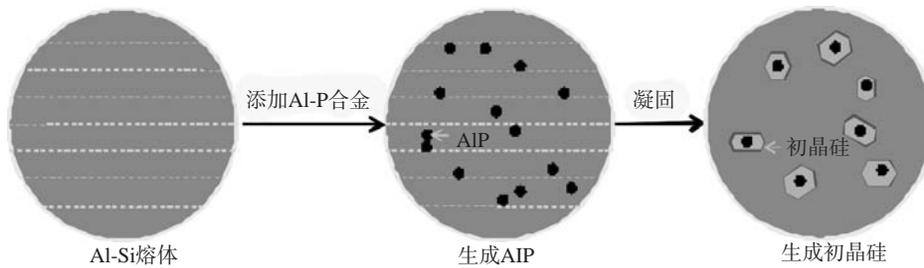


图7 AIP促进初晶硅形核的作用机理

Fig. 7 Schematic of contribution of AIP to the formation of primary Si grains

表3为经Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 2$ )合金细化后初晶硅的平均晶粒尺寸和P的吸收率。经过对比,发现表3中合金5和合金8的平均晶粒尺寸比较接近,即添加0.35%Al-4.5P和添加0.20%Al-4.5P-2AlN晶种合金细化后,初晶硅的平均晶粒尺寸相当,大约为40  $\mu\text{m}$ 。故用Al-4.5P-2AlN合金细化A390合金可以减少P的添加量,即Al-4.5P-2AlN合金对初晶硅的细化效果优于Al-4.5P合金,同时熔体对P的吸收率得到相应提高。

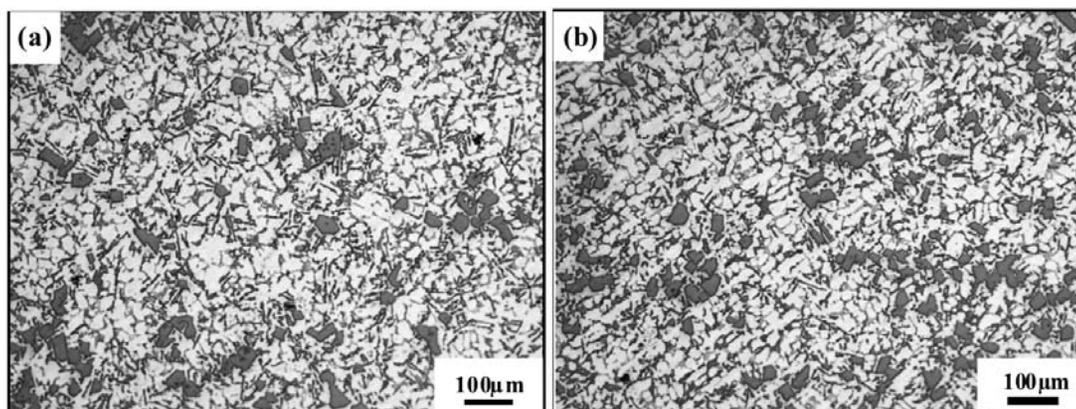
图10为A390合金的室温极限拉伸强度和伸长率。A390合金的室温极限拉伸强度为283 MPa,伸长率为1.32%;经Al-4.5P合金细化后,合金的室温极限拉伸强度为357 MPa,伸长率为2.2%;经Al-4.5P-2AlN合金细化后,合金的室温极限拉伸强度为380 MPa,伸长率为2.4%。与Al-4.5P合金的细化效果相比,A390合金经Al-4.5P-2AlN细化后,其室温极限拉伸性能和伸长率分别提高了约6.4%、8.3%。

表2 经不同AlN含量的Al-P-N晶种合金细化后A390合金中初晶硅的平均晶粒尺寸和P吸收率

Table 2 Average size of primary Si grains and absorption of phosphorus in A390 alloy after refining by Al-P-N crystal seed alloys with different levels of AlN

合金编号	初晶硅平均晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$	铝熔体对磷的吸收率/%
1	41	29.7
2	37	31.3
3	32	35.0
4	30	37.0
9	122	0

图11为A390合金拉伸断口组织。其中图11c为未细化的A390合金拉伸断口形貌,可以看出存在大的解理面和大尺寸的初晶硅晶粒,粗大的初晶硅晶粒在变形过程会割裂基体,产生应力集中,故拉伸强度很低。经Al-4.5P合金细化后,断口组织中的解理面和初晶硅晶粒尺寸略微变小,但依旧较大,为典型的准解离断

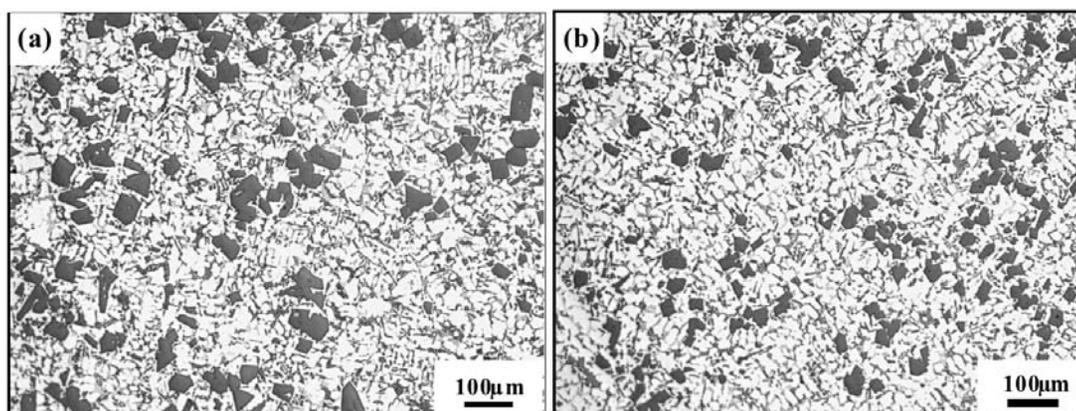


(a)  $x=0$

(b)  $x=2$

图8 A390合金经0.35% Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 2$ )细化后的显微组织

Fig. 8 Microstructure of A390 alloys refined by Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 2$ ) with addition of 0.35%



(a)  $x=0$

(b)  $x=2$

图9 A390合金经0.20% Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 2$ )细化后的显微组织

Fig. 9 Microstructure of A390 alloys refined by Al-4.5P-xAlN ( $x=0, 2$ ) with addition of 0.20%

裂，如图11a所示。当合金受到拉力后会发生轻微变形，然后产生裂纹并迅速膨胀发生脆性断裂<sup>[21]</sup>。经Al-4.5P-2AlN合金细化后，A390合金拉伸断口组织如图11b所示。由于经新型Al-4.5P-2AlN合金细化后，合金中初晶硅的数量增多、尺寸减小，发生变形时，一定量的变形将被分散在更多的晶粒内部，单个晶粒内部由于形变而产生的位错塞积减少，使得合金在断裂之前能承受更大的变形量；其断口形貌中的解理面明显变小，且分布较均匀；局部存在少量韧窝，表明合金仍以脆性断裂为主，局部区域存在微小的塑性变形，因此强度得到改善。

表3 经Al-P-N和Al-P晶种合金细化后A390合金中初晶硅的平均晶粒尺寸和P吸收率  
Table 3 Average size of primary Si grains and absorption of phosphorus in A390 alloy after refining by Al-P-N and Al-P crystal seed alloys

合金编号	初晶硅平均晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$	铝熔体对磷的吸收率/%
5	42	28.0
6	32	42.7
7	52	22.0
8	39	43.0
9	122	0

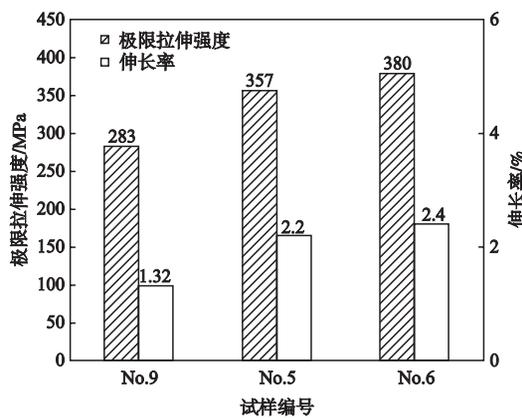
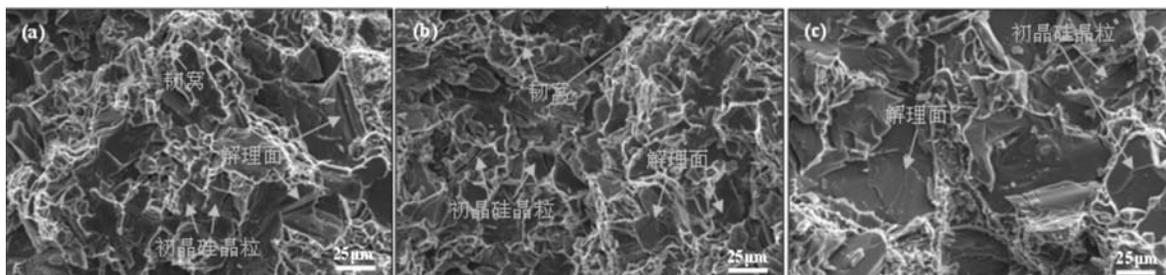


图10 A390合金的拉伸强度和伸长率 (No.9: 未细化, No.5: 经0.35% Al-4.5P合金细化, No.6: 经0.35% Al-4.5P-2AlN合金细化)  
Fig. 10 Tensile strength and elongation of A390 alloys (No.9: unrefined, No.5: refined by 0.35% Al-4.5P alloy, No.6: refined by 0.35% Al-4.5P-2AlN alloy)



(a) 0.35% Al-4.5P (b) 0.35% Al-4.5P-2AlN (c) 未细化

图11 A390合金经不同晶种合金细化后拉伸断口形貌

Fig. 11 Tensile fracture morphologies of A390 alloys with Al-4.5P of 0.35wt.% (a), Al-4.5P-2AlN of 0.35wt.% (b) and without seed crystal alloy (c)

### 3 结论

(1) AlN粒子加入到Al-P合金中后依附在AlP粒子的周围，阻碍AlP粒子的进一步长大，使其尺寸减小并增加AlP粒子的数量。

(2) 与Al-4.5P合金的细化效果相比，A390合金经Al-4.5P-2AlN合金细化后，初晶硅的平均晶粒尺寸减少大约23.8%，熔体对P的吸收率提高约52.4%；同时室温极限拉伸强度和伸长率分别提高了约6.4%、8.3%。

#### 参考文献:

- [1] 刘相法, 乔进国, 宋西贵, 等. Al-P中间合金在Al-Si活塞合金中的应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2002 (6): 43-45.
- [2] LI J H, ZARIF M Z, ALBU M, et al. Nucleation kinetics of entrained eutectic Si in Al-5Si alloys [J]. Acta Materialia, 2014, 72: 80-98.
- [3] WU Yaping, WANG Shujun, LI Hui, et al. A new technique to modify hypereutectic Al-24%Si alloys by a Si-P master alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 477: 139-144.

- [4] SAMUEL E, GOLBAHAR B, SAMUEL A M, et al. Effect of grain refiner on the tensile and impact properties of Al-Si-Mg cast alloys [J]. *Materials & design*, 2014, 56: 468–479.
- [5] LIU Xiaorui, ZHANG Yudong, BEAUSIR Benoit, et al. Twin-controlled growth of eutectic Si in unmodified and Sr-modified Al-12.7%Si alloys investigated by SEM/EBSD [J]. *Acta Materialia*, 2015, 97: 338–347.
- [6] 张俊红, 任智森, 赵群, 等. 变质工艺影响过共晶Al-Si合金初晶硅细化的研究 [J]. *轻合金*, 2006 (10): 62–65.
- [7] 王杰芳, 谢敬佩, 刘忠侠, 等. 国内外铝硅活塞合金的研究及应用述评 [J]. *铸造*, 2005, 51 (1): 24–27.
- [8] Haque M M, Sharif A. Study on wear properties of aluminium-silicon piston alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 118: 69–73.
- [9] STERNER-RAINER R. Aluminium silicon alloy with a phosphorus content of 0.001 to 0.1% [P]. US Patent, No. 1940922, 1933.
- [10] FARAJI M, TODD I, JONES H. Effect of solidification cooling rate and phosphorus inoculation on number per unit volume of primary silicon particles in hypereutectic aluminium-silicon alloys [J]. *Journal of Materials Science*, 2005, 40: 6363–6365.
- [11] KYFFIN W J, RAINFORTH W M, JONES H. Effect of phosphorus additions on the spacing between primary silicon particles in a Bridgman solidified hypereutectic Al-Si alloy [J]. *Journal of Materials Science*, 2001, 36: 2667–2672.
- [12] 姚书芳, 毛卫民, 赵爱民, 等. 过共晶铝硅合金细化变质剂的研究 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2000 (5): 1–3.
- [13] ZUO Min, LIU Xiangfa, SUN Qianqian. Effects of processing parameters on the refinement of primary Si in A390 alloys with a new Al-Si-P master alloy [J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44: 1952–1958.
- [14] ZHANG Henghua, DUAN Haili, SHAO Guangjie, et al. Microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloy modified with Cu-P [J]. *Rare Metals*, 2008, 27: 59–63.
- [15] 齐广慧, 刘相法, 冷严, 等. 变形处理Al-P中间合金对Al-Si合金变质作用的影响 [J]. *铸造*, 2001 50 (11): 658–661.
- [16] 朱向镇. Al-Si-X-P熔体中Al-P团簇演变行为与化学稳定性的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [17] LIU S D, ZHOU X Y, WU W K, et al. Molecular dynamics study on the nucleation of Al-Si melts on sheet substrates at the nanoscale [J]. *Nanoscale*, 2016 (8): 4520–4528.
- [18] GAO T, ZHU X Z, QIAO H, et al. A new Al-Fe-P master alloy designed for application in low pressure casting and its refinement performance on primary Si in A390 alloy at low temperature [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 607: 11–15.
- [19] QIAO Huan, ZHU Xiangzhen, GAO Tong, et al. Influence of deformation on the microstructure and low-temperature refining behavior of Al-3.5P master alloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, 31: 391–396.
- [20] ZHU X Z, JIANG W, LI M R, et al. The effect of Mg adding order on the liquid structure and solidified microstructure of the Al-Si-Mg-P alloy: an experiment and ab Initio study [J]. *Metals*, 2015, 5: 40–51.
- [21] 蔡厚道. 稀土元素Nd变质对ZL101铝合金的显微组织与力学性能的影响 [J]. *铸造*, 2015, 64 (6): 499–503.

## New Type of Al-P-N Seed Crystal Alloy and Its Effect on Microstructure and Mechanical Properties of Hypereutectic Al-Si Alloy

LI Yang<sup>1</sup>, WU Yu-ying<sup>1</sup>, MENG Fan-chao<sup>1</sup>, SUN Qian-qian<sup>2</sup>, ZHAO Shuo<sup>1</sup>, LIU Xiang-fa<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution and Processing of Materials, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. Shandong Al&Mg Melt Technology Company Limited, Jinan 250061, Shandong, China)

### Abstract:

Al-P-N seed crystal alloy and its effect on the microstructure and properties of Al-Si alloys have been investigated in this work. The results showed that AlP and AlN particles formed in the Al-P-N crystal seed alloy, and the AlN particles grew around AlP particles which were greatly refined by the addition of AlN. As compared with Al-P alloy, the reduced size and increased number of AlP particles in the Al-P-N alloy improved the absorption rate of P in the Al-Si alloy. The Al-Si alloy could be refined by less phosphorus addition by using Al-P-N alloy, and the tensile strength at room temperature was significantly improved. Based on the improvement of absorption rate, a absorption model of AlN particles absorption P atomic in Al-Si melt was established.

### Key words:

Al-Si alloy; AlP; seed crystal alloy; refinement; nucleation