

DOI: 10.11973/jxgccl201912005

# NaCl-KCl 基排杂熔剂对 A356 铝合金熔体的净化及净化后的组织和性能

宋莉莉<sup>1,2</sup>, 傅高升<sup>1,2</sup>, 陈鸿玲<sup>1</sup>, 王火生<sup>3</sup>, 林朝升<sup>4</sup>

(1.福州大学材料科学与工程学院,福州 350000;2.宁德职业技术学院,福安 355000;

3.福建工程学院材料科学与工程学院,福州 350000;4.深圳市言声科技有限公司,深圳 518109)

**摘要:**在 NaCl-KCl 基净化熔剂中分别添加 10% NaF、10% NaF+2% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+4% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、3% NaF+2% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+4% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+7% Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> (均为质量分数)制备得到 3 种排杂熔剂(熔剂 I、熔剂 II、熔剂 III),并对 A356 铝合金熔体进行净化处理,研究了不同熔剂的净化效果及净化后合金的显微组织和拉伸性能。结果表明:3 种排杂熔剂均提高了铝合金的冶金质量,净化处理后的组织中夹杂物含量减少、尺寸减小,铝液中的氢含量降低,合金的抗拉强度和伸长率提高;熔剂 III 的净化效果最佳,且最佳添加量(质量分数)为 2%,净化处理后的基体组织均为等轴晶,主要断裂模式为穿晶微孔(韧窝)聚集型韧性断裂。

**关键词:** A356 铝合金;排杂熔剂;熔体净化;显微组织;拉伸性能

**中图分类号:** TG146.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3738(2019)12-0024-05

## Purification of NaCl-KCl Based Inclusion Removal Flux on A356 Aluminum Alloy Melt and Structure and Properties after Purification

SONG Lili<sup>1,2</sup>, FU Gaosheng<sup>1,2</sup>, CHEN Hongling<sup>1</sup>, WANG Huosheng<sup>3</sup>, LIN Chaosheng<sup>4</sup>

(1.School of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350000, China;

2.Ningde Vocational and Technical College, Fuan 355000, China;

3.School of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350000, China;

4.Shenzhen Yansheng Technology Co., Ltd., Shenzhen 518109, China)

**Abstract:** Three inclusion removal fluxes (Flux I, Flux II, Flux III) were prepared by adding 10wt% NaF, 10wt% NaF+2wt% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+4wt% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 3wt% NaF+2wt% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+4wt% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+7wt% Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> into NaCl-KCl based purification flux, respectively, and then were used to purify A356 aluminum alloy melt. The purification effect of different fluxes and the microstructure and tensile properties of the alloy after purification were studied. The results show that all the three inclusion removal fluxes improved the metallurgical quality of the aluminum alloy. The content and size of inclusions in the microstructure after purification were reduced, the hydrogen content in the liquid aluminum decreased, and the tensile strength and elongation of the alloy increased. The purification effect of the flux III was the best, and the optimal addition amount was 2wt%; the purified matrix structure consisted of equiaxed grains, and the main fracture mode was transgranular micropore (dimples) aggregate ductile fracture.

**Key words:** A356 aluminum alloy; inclusion removal flux; melt purification; microstructure; tensile property

收稿日期:2019-01-09;修订日期:2019-11-13

基金项目:福建省教育厅中青年教育科研项目(JA15868);福建省

高校杰出青年科研人才培养计划资助项目(02330021703)

作者简介:宋莉莉(1984—),女,河南商丘人,讲师,博士研究生

导师:傅高升教授

## 0 引言

A356 铝合金因具有优异的铸造性、良好的耐腐蚀性、较高的比强度等,在汽车与航空航天领域有着良好的应用前景。但铸造 A356 铝合金易形成粗大

树枝晶及片状共晶硅组织,因此在实际生产中,低压铸造 A356 铝合金轮毂往往很难同时满足高强度和高塑性的指标要求。冶金质量<sup>[1-2]</sup>是制约合金最终性能的关键因素:铝在熔炼和浇注过程中无法完全隔绝空气和水汽,在高于 400 ℃ 时易反应生成氢气和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物;铝熔体中的氧化夹杂物会成为硅相和富铁相的形核点,促进硅相和富铁相在其上面形核长大,同时也会在后续的加工过程中成为裂纹源,导致铝材强度和韧性的下降<sup>[3-4]</sup>。为了消除组织中夹杂物、气体以及晶粒粗大和二次枝晶间距过大等带来的不利影响<sup>[5]</sup>,提高铝合金的强度和塑性,通常需要对其熔体进行净化、细化和变质等处理<sup>[6]</sup>。目前,研究人员已经在 Al-Si 合金基体相的细化、初晶硅和共晶硅的变质、细化,以及作用机理等方面进行了深入研究,并对双重变质、复合变质<sup>[7-8]</sup>等工艺进行了探索。在前人研究的基础上,作者从合金纯净化处理的角度出发,设计并制备了 3 种 NaCl-KCl 基排杂熔剂,分析了不同排杂熔剂对 A356 铝合金熔体的净化效果,以及净化处理对铝合金组织及力学性能的影响,并研究了不同添加量下净化效果最好的排杂熔剂的作用效果。

## 1 试样制备与试验方法

试验材料为 A356 铝合金锭,经布鲁克 Q4 型直读光谱仪测定,化学成分见表 1。排杂熔剂原料包括 NaCl、KCl、NaF、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> 等,均为分析纯,由天津市致远化学试剂有限公司提供。

表 1 A356 铝合金锭的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of A356 aluminum alloy ingot (mass) %

Si	Mg	Ti	Cu	Zn	Fe	Al
6.67	0.376	0.137	0.031	0.016	0.125	余

在铝合金常规净化熔剂(NaCl-KCl)的基础上,借鉴课题组前期工作<sup>[9-11]</sup>,综合考虑熔剂净化热力学和动力学因素<sup>[12]</sup>设计了 3 种排杂熔剂:熔剂 I,在 NaCl-KCl 基净化熔剂中添加 NaF;熔剂 II,在熔剂 I 的基础上添加发热剂 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>;熔剂 III,在熔剂 II 的基础上添加 Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>。3 种熔剂的具体组成见表 2,制备步骤如下:按照表 2 进行配料,机械混合后倒入刚玉坩埚,置于 SG-5-10 型电阻炉中加热到 750 ℃,振荡混合均匀后浇入石墨模具中,冷却后研磨,装袋待用。采用 DSC-25 型差热分析仪测得熔剂 I、熔剂 II、熔剂 III 的熔点分别为 613.5,591.3,578.0 ℃。

表 2 3 种排杂熔剂的主要组成(质量分数)

Table 2 Main components of three inclusion removal fluxes (mass) %

编号	NaCl	KCl	NaF	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>
I	45	45	10	—	—	—
II	42	42	10	2	4	—
III	42	42	3	2	4	7

将 A356 铝合金锭置于石墨坩埚中,在 SG-Y5-10 型电阻炉中以 20 ℃·min<sup>-1</sup> 的速率升温到 730 ℃ 进行熔炼,熔炼时间 30 min,再升温到 750 ℃ 后加入自制排杂熔剂,添加量为 2%(质量分数,下同),静置 30 min 后扒渣;采用金属型浇注,铸锭尺寸为 200 mm×100 mm×20 mm。在试验过程中采用 DRZ-6 型温度仪监控炉温,采用 NiCr-NiAl 型热电偶实时测定熔体温度。采用 ELH-IV 型测氢仪在线测定氢含量,精度为每 100 g 铝液 0.01 mL。

分别采用熔剂冲洗法和定量金相法测定夹杂物含量。熔剂冲洗法:按照组成(质量分数)为 7% 冰晶石、3% NaF、45% NaCl、45% KCl 进行配料(总质量为 50 g),倒入氧化铝坩埚中,将坩埚置于 SG-5-10 型电阻炉中加热到 750 ℃,取约 5 g 铝合金锭放入坩埚,反复搅拌 20 min,取出坩埚,空气冷却;冷却后用热水溶解凝固的熔剂,拣出铝块,再过滤出沉淀物。使用精度为 0.000 1 g 的分析天平称取熔剂冲洗前后铝合金的质量,测 3 个取平均值。夹杂物含量计算公式为

$$\omega_{\text{inclusion}} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\omega_{\text{inclusion}}$  为夹杂物质量分数; $m_0, m_1$  分别为合金经熔剂冲洗前后的质量。

定量金相法:在铸锭上截取金相试样,经抛光处理后,采用 XJG-05 型光学显微镜观察夹杂物形貌,视场放大倍数为 100 倍,随机取 30 个视场测定夹杂物的面积分数<sup>[13]</sup>,取平均值。

将抛光态金相试样用体积分数 0.5% HF 溶液腐蚀后,使用 XJG-05 型光学显微镜观察显微组织,使用 Image-Pro Plus 6.0 软件进行晶粒尺寸和二次枝晶间距统计。根据 GB/T 228.1—2010,使用 Instron1185 型万能试验机进行拉伸试验,采用棒状比例试样,试样尺寸见图 1,拉伸速度为 2 mm·min<sup>-1</sup>;采用 S3400N 型扫描电镜观察拉伸断口形貌。

优选出净化效果最好的排杂熔剂,研究了其添加量(质量分数分别为 1%,2%,3%)对净化效果以

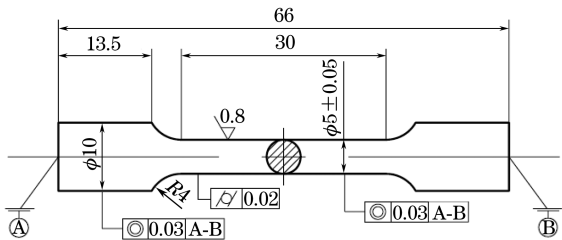


图 1 拉伸试样的尺寸

Fig.1 Dimension of tensile specimen

及铝合金组织和性能的影响。制备工艺、测试方法均同前,夹杂物含量采用熔剂冲洗法测定。

2 试验结果与讨论

2.1 净化效果

由表 3 可以看出,采用自制排杂熔剂净化处理后,氢含量与夹杂物含量较未处理的均明显下降,熔剂Ⅲ的排杂效果和除氢效果均最佳。

表 3 不同排杂熔剂处理后 A356 铝合金中的夹杂物含量和铝液中的氢含量

Table 3 Inclusion content in A356 aluminum alloy and hydrogen content in liquid aluminum after treatment with different inclusion removal fluxes

条件	夹杂物		每 100 g 铝液 氢含量/mL
	质量分数/%	面积分数/%	
未处理	1.135 1	0.263 3	0.198
熔剂 I	0.415 3	0.102 5	0.125
熔剂 II	0.386 3	0.090 1	0.122
熔剂 III	0.325 4	0.050 0	0.117

熔剂排杂净化是个复杂的多相作用过程。排杂熔剂的主要作用是破坏铝液表层的氧化物,促使铝液充分融入到铝熔体中,并降低铝熔体的表面张力,促使夹杂物浮至铝液表面以便于扒渣去除。在此过程中,良好的热力学和动力学条件是排杂熔剂具有良好净化效果的必备条件。在相同的熔体处理温度下,排杂熔剂的熔点越低、过热度越大、黏度越小,越有利于其流动和扩散,动力学条件越好,净化效果也越好。熔剂 I、熔剂 II、熔剂 III 的熔点依次降低,动力学条件依次变好,净化效果也依次提高。

熔剂 I 和熔剂 II 中均添加了质量分数 10%NaF,以溶解氧化物并降低熔体的黏度<sup>[6]</sup>。与熔剂 I 相比,熔剂 II 中还添加了 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>。碳酸盐和硫酸盐均能发生分解或者与铝反应产生大量气体,同时释放大热量<sup>[14]</sup>,从而增强熔剂的流动与分散,改善夹杂物的扩散条件,因此熔剂 II 的净化效果优于熔剂 I 的。与熔剂 II 相比,熔剂 III 用质量分数 7%的 Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>

替代了质量分数 7%的 NaF。作者进行了这 2 种氟化物溶解铝合金表面氧化膜能力的对比试验:在 NaCl-KCl 体系中分别添加了质量分数均为 1%的 NaF 和 Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> 制成排杂熔剂;采用熔剂冲洗法在温度 750 °C 下对 A356 铝合金屑进行处理,冷却后取出铝合金屑,观察其宏观形貌。由图 2 可以看出:铝合金屑在 2 种熔剂中都聚合为小球状,在含 Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> 的排杂熔剂中的尺寸更大、均匀性更好,表明 Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> 具有更强的破坏氧化膜、促进铝液聚合的效果,这与张宇<sup>[15]</sup>的研究结果相同。因此,熔剂 III 相比于熔剂 I 和熔剂 II 表现出了更优越的净化效果。

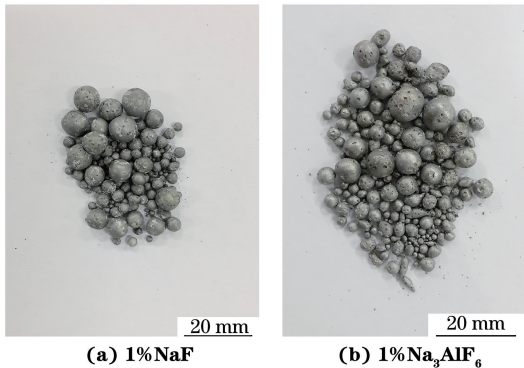


图 2 含不同氟化物排杂熔剂处理后 A356 铝合金屑的宏观形貌

Fig.2 Macromorphology of A356 aluminum alloy chips after treatment with inclusion removal fluxes containing different fluorides

2.2 净化处理对铝合金显微组织的影响

未进行净化处理的铝合金中,夹杂物清晰可见,可观察到尺寸大于 100 μm 的夹杂物,如图 3(a)所示;经熔剂 I 净化处理后,夹杂物的尺寸减小、数量减少,其尺寸大多在几十微米,如图 3(b)所示;经熔剂 II 净化处理后,组织中的夹杂物数量进一步减少,尺寸在 10 μm 以下,且 α-Al 基体相的晶粒尺寸减小,如图 3(c)所示;经熔剂 III 净化处理后,视野内夹杂物几乎不可见,且 α-Al 基体组织全部转变为等轴晶,晶粒细小均匀且形状圆整,如图 3(d)所示。经统计,经熔剂 I、熔剂 II、熔剂 III 净化处理后的晶粒尺寸分别由未净化处理的 42.9 μm 减小到 38.2,36.3,28.1 μm,二次枝晶间距由未净化处理的 39.8 μm 分别降低到 37.1,32.0,24.9 μm,熔剂 III 净化处理后的降低了约 37.4%。

未净化处理时,铸态 A356 铝合金组织中粗大的板条状硅相分布在 α-Al 基体上,如图 4(a)所示;这些粗大的组织及其尖锐的棱角和边界容易造成应力集中,成为裂纹源,导致合金强度和塑性较低。采用排杂熔剂进行净化处理后,合金组织中的粗大共晶硅相变得细小,如图 4(b)~图 4(d)所示,这是因



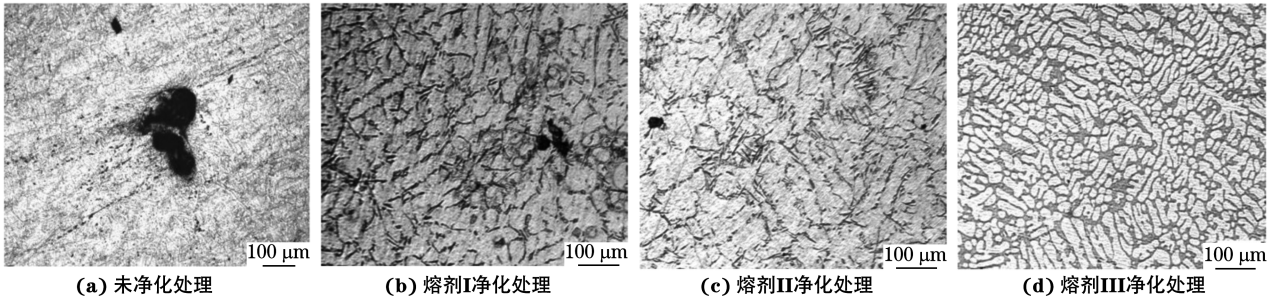


图 3 不同排杂熔剂处理前后铸态 A356 铝合金的显微组织

Fig.3 Microstructures of as-cast A356 aluminum alloy before (a) and after (b—d) treatment with different inclusion removal fluxes: (b) purification with flux I ; (c) purification with flux II and (d) purification with flux III

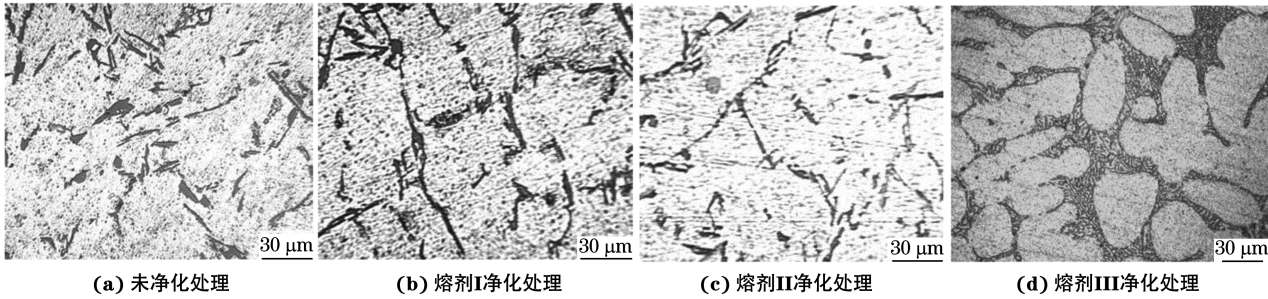


图 4 不同排杂熔剂处理前后铸态 A356 铝合金的硅相形貌

Fig.4 Morphology of Si phase of as-cast A356 aluminum alloy before (a) and after (b—d) treatment with different inclusion removal fluxes: (b) purification with flux I ; (c) purification with flux II and (d) purification with flux III

为排杂熔剂对硅相有一定的变质效果。对比可知,采用熔剂Ⅲ净化处理后,共晶硅相的尺寸最细小、分布最均匀。

2.3 净化处理对铝合金拉伸性能的影响

由表 4 可以看出,不同排杂熔剂净化处理后,铸态 A356 铝合金的抗拉强度和伸长率均出现不同程度的提高,其中熔剂Ⅲ净化处理后的提高幅度最大,抗拉强度和伸长率分别较未净化处理的提高了 14.1%,129.1%。

就铸态 A356 铝合金而言,在拉伸载荷作用下,裂纹总是通过硅相颗粒或夹杂物的自身开裂或与基体的分离而萌生,以沿晶扩展方式沿 α 枝晶边界穿过共晶区,因此其力学性能主要取决于晶粒尺寸以

表 4 不同排杂熔剂处理前后铸态 A356 铝合金的拉伸性能  
Table 4 Tensile properties of as-cast A356 aluminum alloy before and after treatment with different inclusion removal fluxes

条件	抗拉强度/MPa	伸长率/%
未净化处理	170	4.61
熔剂Ⅰ净化处理	180	6.32
熔剂Ⅱ净化处理	186	6.64
熔剂Ⅲ净化处理	194	10.56

及硅相的形貌、尺寸和分布。此外,材料的力学性能对冶金缺陷如缩松(孔)、夹杂物等极为敏感。由图 5 可以看出:未净化处理的铝合金拉伸断口上存在

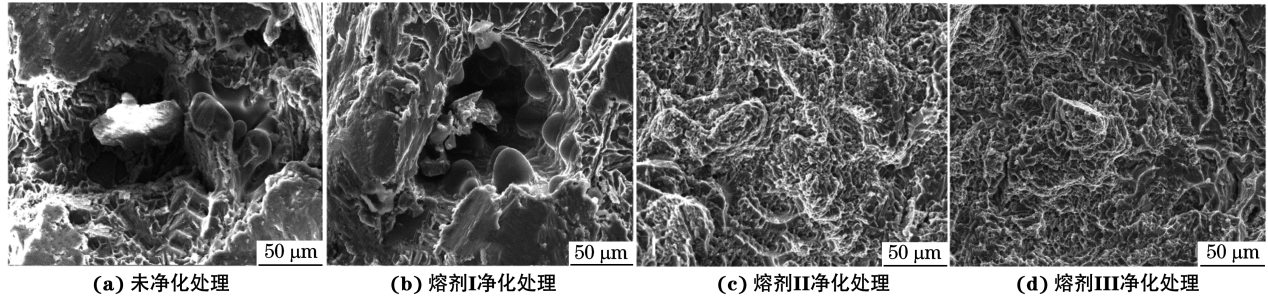


图 5 不同排杂熔剂处理前后铸态 A356 铝合金的拉伸断口形貌

Fig.5 Tensile fracture morphology of as-cast A356 aluminum alloy before (a) and after (b—d) treatment with different inclusion removal fluxes: (b) purification with flux I ; (c) purification with flux II and (d) purification with flux III



较多的缩松(孔)和粗大的夹杂物,解理断裂占比较大,韧窝比例很少,断裂主要发生在缩松(孔)和夹杂物处;经熔剂Ⅰ和熔剂Ⅱ处理后,拉伸断口上的缩松(孔)和夹杂物数量减少,韧窝增多;经熔剂Ⅲ净化处理后,拉伸断口上未观察到显微缩松(孔)和粗大的夹杂物,韧窝小且深、分布均匀,断裂方式主要为穿晶微孔(韧窝)聚集型韧性断裂。综上可见,净化处理后夹杂物数量的减少明显影响到了铝合金的断裂形式。

### 2.4 添加量对净化效果及合金组织和性能的影响

由表 5 可以看出:随着熔剂Ⅲ添加量的增加,铝液中的氢含量及铸态 A356 铝合金中的夹杂物含量均呈先降低后增长的变化趋势,抗拉强度和伸长率则呈先增大后降低的变化趋势;当添加量为 2%时,熔剂Ⅲ的净化效果最佳,合金的拉伸性能最好。

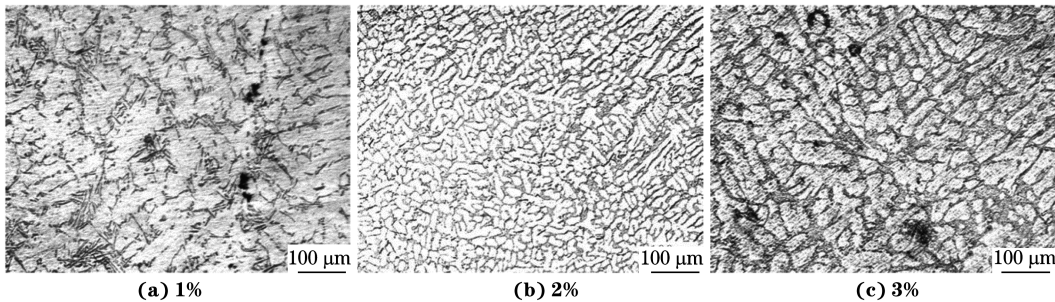


图 6 不同添加量熔剂Ⅲ净化处理后铸态 A356 铝合金的显微组织  
Fig.6 Microstructures of as-cast A356 aluminum alloy after purification with flux Ⅲ of different addition amounts

综上可知,当添加量为 2%时,熔剂Ⅲ的净化效果最为明显。添加量为 3%的净化效果略有下降,主要原因是熔剂Ⅲ中存在少量强发热剂  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ;添加量较多时的发热量也较大,这会造成铝液的氧化烧损,生成与铝液具有良好润湿性的氧化物而重新污染铝液,同时生成的渣和铝易粘在一起难以分离<sup>[16]</sup>,导致夹渣等缺陷。

## 3 结 论

(1) 在 NaCl-KCl 基净化熔剂中分别添加 1%NaF、10% NaF + 2%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + 4%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、3%NaF+2% $\text{Na}_2\text{SO}_4$ +4% $\text{Na}_2\text{CO}_3$ +7% $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ,制备了 3 种排杂熔剂(熔剂Ⅰ、熔剂Ⅱ和熔剂Ⅲ);3 种排杂熔剂均显著提高了 A356 铝合金的冶金质量,经排杂熔剂净化处理后 A356 铝合金组织中的夹杂物含量减少、尺寸减小,铝液中的氢含量降低;以  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  取代部分 NaF 的熔剂Ⅲ的净化效果最佳,且最佳添加量为 2%。

(2) 3 种排杂熔剂净化处理后,A356 铝合金的

表 5 不同添加量熔剂Ⅲ的净化效果及净化后铝合金的拉伸性能  
Table 5 Purification effect of flux Ⅲ with different addition amounts and tensile properties of aluminum alloy after purification

质量分数/ %	净化效果参数		拉伸性能	
	夹杂物质量 分数/%	每 100 g 铝液 氢含量/mL	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %
1	0.403 2	0.139	182	6.56
2	0.325 4	0.117	194	10.56
3	0.337 3	0.126	190	9.68

由图 6 可以看出:当熔剂Ⅲ的添加量为 2%时,净化后铝合金组织中未观察到明显的夹杂物,而添加量为 1%或 3%时,可以观察到细小且弥散分布的夹杂物。

基体相晶粒尺寸、二次枝晶间距和共晶硅相尺寸均减小,抗拉强度和伸长率均有所提高;熔剂Ⅲ净化处理后的基体相均为等轴晶,伸长率与未净化处理的相比提高了 129.1%,其主要断裂模式为穿晶微孔(韧窝)聚集型韧性断裂。

### 参考文献:

[1] TILAK R, SONG G. 铝熔体精炼系统之净化效率:中国铸造现代化战略中的重要环节[J]. 有色金属再生与利用, 2004 (2):12-14.

[2] ISSHIKI M, MIMURA K, UCHIKOSHI M. Preparation of high purity metals for advanced devices[J]. Thin Solid Films, 2011, 519(24): 8451-8455.

[3] KELES O, DUNDAR M. Aluminum foil: Its typical quality problems and their causes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186(1/2/3): 125-137.

[4] 李建国, 王亮, 杨文言. A356 铝合金中裂纹的萌生及其扩展[J]. 轻合金加工技术, 2002, 30(12): 30-34.

[5] CAMPBELL J. Entrainment defects[J]. Materials Science and Technology, 2006, 22(2): 127-145.

未焊透缺陷。

### 3 结 论

(1) 当焊接速度为  $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时,接头根部接合面实现了良好的固相连接,其根部缺陷主要为 S 线缺陷。

(2) 当焊接速度为  $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时,接头根部缺陷主要为弱结合缺陷;弱结合缺陷由不连续的微裂纹构成,微裂纹主要分布在搅拌针端部与底面之间距底面  $2.5 \mu\text{m}$  范围内,靠近搅拌针端部的接合面实现了良好的固相连接。

(3) 当焊接速度为  $600 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时,接头根部缺陷主要为未焊透缺陷;未焊透缺陷主要由连续的微裂纹组成,在未焊透缺陷向焊核区方向存在不连续微裂纹形式的弱结合缺陷。

(上接第 28 页)

- [6] 柯东杰,王祝堂.当代铝熔体处理技术[M].北京:冶金工业出版社,2010.
- [7] ZUO M, ZHAO D G, TENG X Y, et al. Effect of P and Sr complex modification on Si phase in hypereutectic Al-30Si alloys[J]. Materials & Design, 2013, 47: 857-864.
- [8] QIU K, WANG R C, PENG C Q, et al. Effect of individual and combined additions of Al-5Ti-B, Mn and Sn on sliding wear behavior of A356 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(12): 3886-3892.
- [9] 胡星晔,傅高升,陈鸿玲,等.高性能铝合金用排杂净化熔剂组成的设计与优化试验[C]//福建省科协第五届学术年会数字化制造及其它先进制造技术专题学术年会论文集.厦门:福建省机械工程学会,2005.

### 参考文献:

- [1] 戴明亮,胡志力,万心勇,等. S 线对搅拌摩擦焊热处理接头力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(7): 46-50.
- [2] 戴启雷,王秀义,侯振国,等.焊接速度对 AA6082 搅拌摩擦焊接头根部缺陷及性能的影响[J].焊接学报,2015,36(8):27-30.
- [3] 王廷,朱丹阳,刘会杰,等. 7050-T7451 铝合金的搅拌摩擦焊接试验分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(8): 109-112.
- [4] SATO Y S, YAMASHITA F, SUGIURA Y, et al. FIB-assisted TEM study of an oxide array in the root of a friction stir welded aluminium alloy[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(3): 365-369.
- [5] 张坤,张海涛,孟强,等. 焊接速度对机器人搅拌摩擦焊 AA7B04 铝合金接头组织和力学性能的影响[J]. 工程科学学报, 2018, 40(12): 1525-1532.
- [6] LIU H J, CHEN Y C, FENG J C. Effect of zigzag line on the mechanical properties of friction stir welded joints of an Al-Cu alloy[J]. Scripta Materialia, 2006, 55(3): 231-234.
- [10] 傅高升,康积行,陈文哲,等. 铝熔体中夹杂物与气体相互作用的关系[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(增刊 1): 51-56.
- [11] 傅高升,康积行. 铝熔体中熔剂的净化作用特性分析[J]. 铸造技术, 1995(6):23-26.
- [12] 李培杰,郭景杰,贾均,等. 铝熔体熔剂精炼的热力学及动力学分析[J]. 材料科学与工艺, 1995(3):82-86.
- [13] 阮中慈.图像分析仪定量分析中测量参数的选择[J].材料工程,1995(6):38-39.
- [14] 官可湘,李洁,倪大兴. 铝及铝合金熔体净化剂研究进展[J]. 化学世界, 2007, 48(6): 370-373.
- [15] 张宇. 金属铝在冰晶石体系中溶解度的研究[D]. 沈阳:东北大学, 2015.
- [16] 张承甫. 液态金属的净化与变质[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1989.

## 欢迎订阅《机械传动》杂志

《机械传动》杂志创刊于 1977 年(原名齿轮),由中国机械工业联合会主管,郑州机械研究所有限公司、中国机械工程学会、中国机械通用零部件工业协会齿轮分会共同主办,是中国机械工程学会机械传动分会和中国机械通用零部件工业协会齿轮分会两组织的会刊。

本刊是中文核心期刊,中国科技核心期刊,中国科学引文数据库和中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊,中国期刊网、中国学术期刊(光盘版)入编期刊,中国期刊全文数据库收录期刊。

本刊主要报导机械传动领域(包括齿轮传动、机构学、链传动、带传动、机械无级变速传动等)的理论、设计、试验研究、测量、材料热处理、制造、润滑等方面的新成果、新技术、

新工艺以及国内外发展动向等方面的著作和信息。

本刊每月 15 日出版,每期 176 页,定价 20 元/期,全年 240 元。国内统一代号:CN41-1129/TH,国际标准刊号:ISSN1004-2539,广告许可证号:4101004000011,邮发代号:36-36,全国各地邮局均可订阅。

本刊竭诚欢迎机械行业的各类人士踊跃投稿、订阅、刊登广告。

地 址: 河南省郑州市嵩山南路 81 号

邮 编: 450052

电 话: 0371-67710817 传真:0371-67710817

网 址: <http://jxcd.chinajournal.net.cn>

E-mail: [jxcd@chinajournal.net.cn](mailto:jxcd@chinajournal.net.cn)