

# Fe 含量对亚共晶 Al-Ni 合金微观组织、热导率和力学性能的影响

刘亦贤<sup>1</sup>, 刘永昌<sup>2, 3</sup>, 万翱翔<sup>1</sup>, 王鹏展<sup>1</sup>, Saria Akhtar<sup>1</sup>, 葛素静<sup>3, 4</sup>, 霍臣明<sup>2, 3</sup>,  
苑高利<sup>2, 3</sup>, 张祎程<sup>2, 3</sup>, 熊守美<sup>1, 4</sup>

(1. 清华大学材料学院, 北京 100084; 2. 河北新立中有色金属集团有限公司, 河北保定 071100;  
3. 河北省轻金属合金材料技术创新中心, 河北保定 071100; 4. 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 研究了不同Fe含量对亚共晶Al-4Ni合金微观组织、热导率以及力学性能的影响。结果表明, 当不存在Fe时, 合金中的微观组织主要是初生 $\alpha$ -Al和( $\alpha$ -Al+Al<sub>3</sub>Ni)共晶组织。随着Fe元素增加至0.5%, 初生相仍为 $\alpha$ -Al, 共晶组织变为( $\alpha$ -Al+Al<sub>3</sub>Ni)二元共晶和( $\alpha$ -Al+Al<sub>3</sub>Ni+Al<sub>9</sub>NiFe)三元共晶。当Fe含量超过0.75%, 初生相为Al<sub>9</sub>NiFe, 同时形成halo铝枝晶, 共晶组织变为( $\alpha$ -Al+Al<sub>9</sub>NiFe)二元共晶和( $\alpha$ -Al+Al<sub>3</sub>Ni+Al<sub>9</sub>NiFe)三元共晶。随着Fe元素的加入, Al-4Ni-xFe合金的热导率呈下降趋势, 这主要与合金 $\alpha$ -Al基体中Fe原子的固溶量和Al<sub>9</sub>NiFe相的含量和形貌相关。在力学性能方面, 随着Fe的增加, Al-4Ni-xFe的屈服强度不断增加, 伸长率先缓慢下降再急剧下降, 这主要是由于合金中形成了Al<sub>9</sub>NiFe初生相, 加速了裂纹的扩展。综合考虑, Al-4Ni-0.5Fe合金的热导率和力学性能取得了较好的权衡, 具有最佳的综合性能。

**关键词:** Al-Ni合金; Fe元素; 微观组织; 热导率; 力学性能

## 作者简介:

刘亦贤(1997-), 男, 博士生, 主要从事高导热压铸铝合金的研究。E-mail: leoliuyixian@163.com

## 通讯作者:

熊守美, 男, 教授。E-mail: smxiong@tsinghua.edu.cn

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

03-0282-08

## 基金项目:

国家自然科学基金面上项目(52175335)。

## 收稿日期:

2023-11-23 收到初稿,

2024-01-05 收到修订稿。

铝合金由于具备热导率高、密度小、比强度和比刚度高、耐腐蚀性好、成本低等诸多优异特性, 被广泛用于制造新能源汽车逆变器外壳和电机转子、5G通讯基站壳体、手机中框等一系列金属散热部件<sup>[1-2]</sup>。在众多铝合金中, Al-Si合金因具有优异的铸造性能、较好的力学性能和低的成本而应用最为广泛, 诸如A356<sup>[3]</sup>、ADC12<sup>[4]</sup>、AlSi<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub><sup>[5]</sup>等。然而, Al-Si合金中Si元素的含量通常在6%以上, Si元素在铝中的极限固溶度可达1.65wt.%<sup>[6-7]</sup>。因此, Al-Si合金的相组成为( $\alpha$ -Al+Si共晶), 尽管目前已有相当多针对共晶硅变质的研究<sup>[8-10]</sup>, 大大优化了共晶硅的形貌结构, 但是高的Si含量使合金中的共晶硅含量依然很高, 阻碍了电子传导。因此, Al-Si合金在铸态下难以获得很高的热导率。Al-Si合金的热导率通常在100~150 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>之间, 目前在散热部件上应用最广泛的压铸ADC12合金的热导率仅仅只有96 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup><sup>[11]</sup>。近年来, 随着高新技术的快速发展, 设备的功率密度和产热不断增大, 对金属散热部件也提出了更高的性能要求。以上的事实表明, Al-Si合金已经很难满足高导热铝合金的发展需求, 导热铝合金材料的革新, 需要发展新的铝合金体系。

为了寻找具有更高热导率的铸态铝合金, 学者们开始关注无硅的铝合金。其中, Ni元素由于共晶成分低(约为5wt.%)、在铝中的极限固溶度低(约为0.05wt.%)等优势而被视为新型高导热铝合金的重要选择。目前, 国内外已开展很多关于Al-Ni合金的研究工作。美国Tesla公司在2018年设计开发了Al-5.3Ni压铸铝合金, 该合金在保证较好的铸造性能的同时, 电导率可高达50%IACS(热导率在190~200 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>之间), 证实了Al-Ni合金在高导热合金领域的发展潜力<sup>[12]</sup>。Wang等人通过向Al-5Ni合金中添加Yb元素, 协同提高了Al-Ni合金的强度和热导率<sup>[10]</sup>。目前所使用的散热部件多采用压铸成形, 而Fe是压铸过程中与Al-Ni合金接触的必然元

素。有可能进入Al-Ni合金中影响合金的性能。但是在现有的研究中,还缺乏有关于Fe元素对Al-Ni合金微观组织、热导率和力学性能影响规律的研究。

本工作以铸态Al-4Ni- $x$ Fe ( $x=0, 0.3, 0.5, 0.75, 1, 1.5$ )合金为对象,研究了不同含量的Fe元素对Al-4Ni- $x$ Fe合金微观组织、热导率和力学性能的影响规律。

## 1 试验方法

本试验将工业纯铝(99.5%)、Al-10Ni中间合金、Al-10Fe中间合金按照理论成分配比加入到石墨坩埚中,并在830℃下熔化,待熔体降温至750℃后浇注于模具中,制备不同铁含量(0、0.3wt.%、0.5wt.%、0.75wt.%、1wt.%和1.5wt.%)的Al-4Ni- $x$ Fe合金铸锭,如图1a所示。试验制备的6种合金的化学成分见表1。

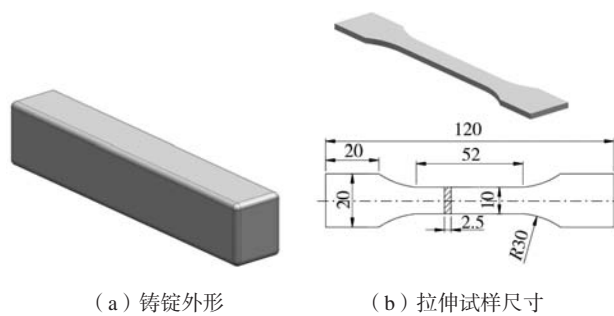


图1 铸锭外形和拉伸试样尺寸  
Fig. 1 Configuration of casting and tensile test sample

表1 Al-4Ni- $x$ Fe合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of Al-4Ni- $x$ Fe alloys  $w_B/\%$

合金	Ni	Fe	Al
Al-4Ni	3.93	-	余量
Al-4Ni-0.3Fe	3.92	0.327	余量
Al-4Ni-0.5Fe	3.91	0.545	余量
Al-4Ni-0.75Fe	3.8	0.762	余量
Al-4Ni-1Fe	3.97	1.02	余量
Al-4Ni-1.5Fe	3.87	1.42	余量

从合金铸锭中切取 $\Phi 6.4$  mm  $\times$  10 mm样品,经过打磨、抛光后进行X射线衍射(XRD)分析,扫描速率 $10^\circ/\text{min}$ 。采用0.5%HF水溶液对样品表面进行腐蚀,使用光学显微镜(OM)和搭配能谱仪(EDS)的扫描电子显微镜(SEM)对合金的微观组织以及微区成分含量进行分析。通过计算机断层扫描技术(GENanotom m)获得孔洞的三维信息。断层扫描的电压和电流分别为100 kV和110  $\mu\text{A}$ ,分辨率为3  $\mu\text{m}$ 。合金电导率可通过直流数字电阻测试仪获得,试样尺寸为50 mm  $\times$  5 mm

$\times 3$  mm。从铸锭上分别切下 $\Phi 12.7$  mm  $\times$  2 mm的样品,测试合金密度( $\rho$ ),并采用LFA测试合金的热扩散系数( $\alpha$ )。通过Neumann-Kopp定律计算比热( $C_p$ )。通过式(1)即可获得合金热导率( $\lambda$ )。

$$\lambda = \alpha C_p \rho \quad (1)$$

拉伸试样从铸锭上截取,试样尺寸见图1b,采用万能电子试验机进行常温拉伸性能测试,拉伸速度为1 mm/min。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 Al-4Ni- $x$ Fe 微观组织

图2是不同Fe含量的Al-4Ni- $x$ Fe合金的显微组织。从图2a可以看出,Al-4Ni铸态合金的组织由初生 $\alpha$ -Al与共晶组成。这些共晶组织以共晶团的形式存在,不同的共晶团之间存在明显的界面。图2a1为深腐蚀后的Al-4Ni合金微观组织,可以发现在共晶团内部,共晶第二相以纤维状生长并平行排列,单个共晶纤维的直径约为200 nm。图2b和2c分别为Fe含量为0.3%和0.5%时铸态合金的微观组织。当Fe含量为0.3%,共晶团被破坏,共晶第二相在组织中的分布变得更加随机,形貌转变为层片状。当Fe含量增加到0.5%时,层片状共晶第二相更加粗大。当Fe含量超过0.75%后,如图2d-e显示,Al-4Ni-0.75Fe的微观组织中形成了板条状的初生相,其随着Fe含量的增加逐渐粗化。

图3是Al-4Ni、Al-4Ni-0.5Fe和Al-4Ni-1.5Fe三种合金的XRD结果。结合图2的微观组织,这三种成分分别代表Al-4Ni- $x$ Fe合金的三个类型,即未添加Fe( $x=0$ )、添加Fe且合金处于亚共晶成分( $0.3 \leq x \leq 0.75$ )、添加Fe且合金处于过共晶成分( $1 \leq x \leq 1.5$ )。其中,Al-4Ni的XRD图谱显示合金中存在 $\text{Al}_3\text{Ni}$ 化合物,这种化合物即为该合金在图2展示的微观组织中的共晶第二相。Al-4Ni-0.5Fe的XRD衍射峰包括 $\text{Al}_9\text{NiFe}$ 和 $\text{Al}_3\text{Ni}$ 相。相比于Al-4Ni合金, $\text{Al}_3\text{Ni}$ 相的衍射峰强度明显下降。而Al-4Ni-1.5Fe合金的XRD结果显示,合金中依旧含有 $\text{Al}_9\text{NiFe}$ 和少量的 $\text{Al}_3\text{Ni}$ 相。

图4为合金第二相形貌及能谱结果。图4a-a3为Al-4Ni-0.5Fe样品中共晶相在扫描电镜下的形貌以及对应的元素分布。在合金中能发现两种类型的共晶第二相:一种是由Al、Fe和Ni三种元素组成的层片状共晶相,另一种是仅由Al和Ni组成的细小斑点状共晶相。结合在Al-4Ni合金中的组织形貌和Al-4Ni-0.5Fe合金中的XRD结果,Al-4Ni-0.5Fe样品中细小斑点状共晶第二相应为 $\text{Al}_3\text{Ni}$ (三维形貌成纤维状)。根据文献报道<sup>[17]</sup>和Al-4Ni-0.5Fe合金XRD结果中的 $\text{Al}_9\text{NiFe}$ 衍射峰,当Fe与Ni元素共同存在时会形成 $\text{Al}_9\text{NiFe}$ 化合物。这说明Al-4Ni-0.5Fe合金中的层片状共晶第二相应为 $\text{Al}_9\text{NiFe}$ 相,

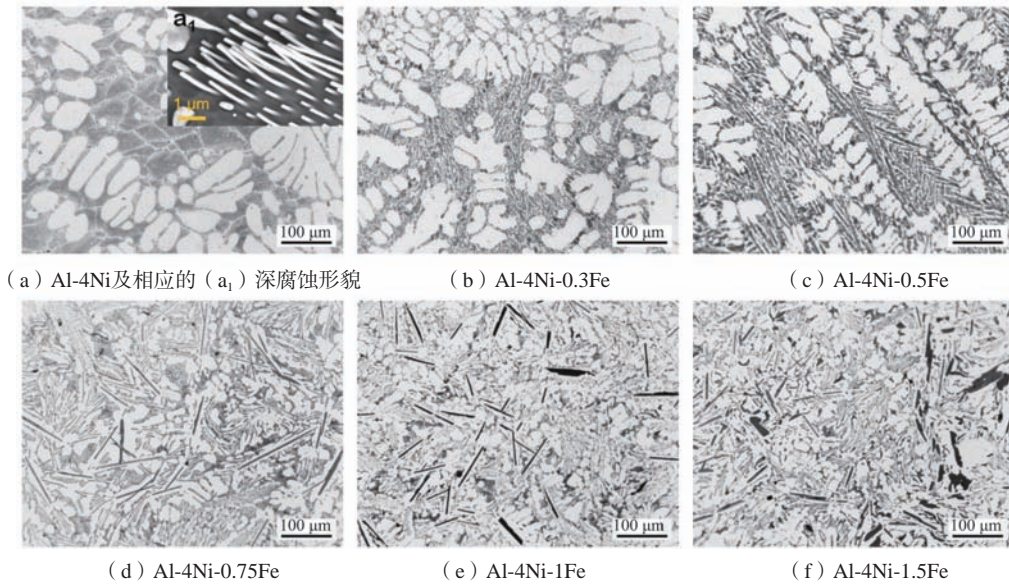


图2 Al-4Ni-xFe合金微观组织

Fig. 2 Microstructure of Al-4Ni-xFe alloys

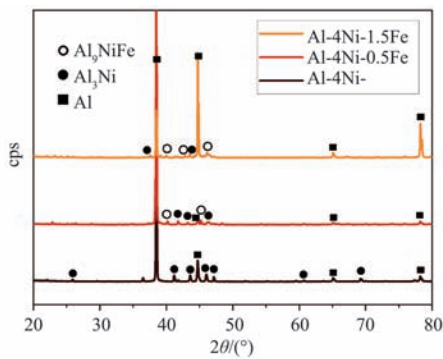
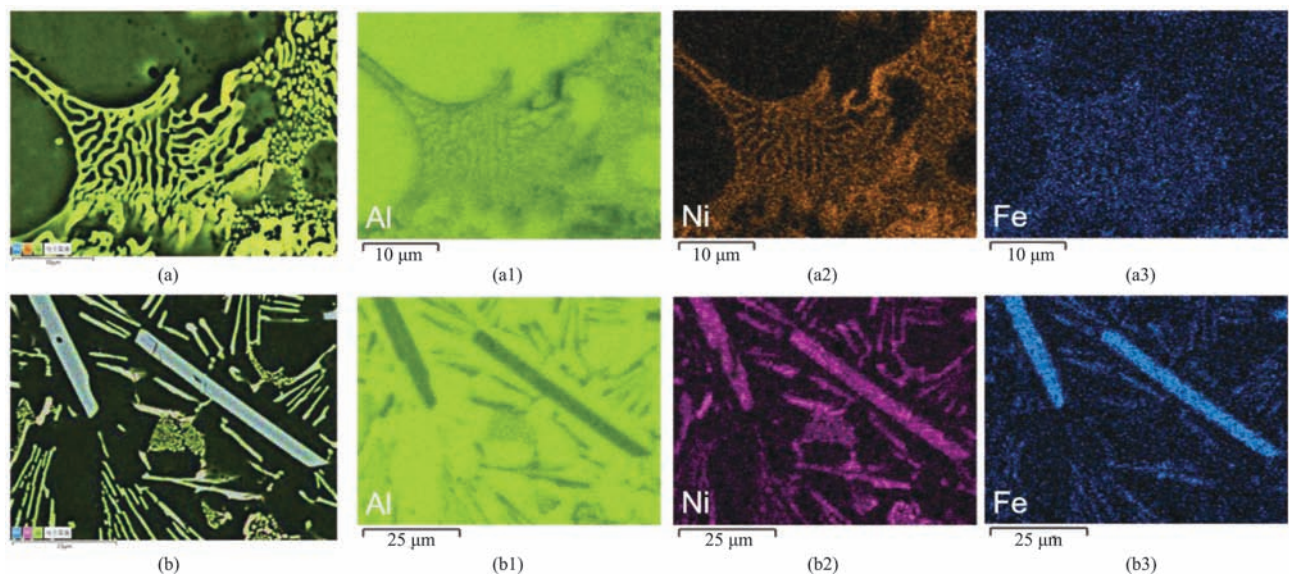


图3 Al-4Ni、Al-4Ni-0.5Fe和Al-4Ni-1.5Fe合金XRD结果

Fig. 3 XRD results of Al-4Ni, Al-4Ni-0.5Fe and Al-4Ni-1.5Fe alloys

即Fe元素的加入让共晶组织中出现了 $Al_9NiFe$ 化合物。图4b-b3为Al-4Ni-1.5Fe合金中的板条初生相。能谱面扫描结果表明，初生相中同样含有Al、Fe和Ni三种元素。结合Al-4Ni-1.5Fe合金的XRD结果中出现的 $Al_9NiFe$ 衍射峰，Al-4Ni-1.5Fe合金中的初生相也应为 $Al_9NiFe$ 化合物。此外，图4b也显示了初生 $Al_9NiFe$ 相周围被 $\alpha$ -Al包围，并没有紧邻共晶组织，这是因为初生相 $Al_9NiFe$ 的形成会造成周围液相Fe、Ni的局域贫乏，此时金属液变为了亚共晶成分，因而形成过共晶合金非平衡凝固中常见的halo铝枝晶。



(a-a3) Al-4Ni-0.5Fe; (b-b3) Al-4Ni-1.5Fe

图4 合金第二相形貌及能谱结果

Fig. 4 Morphology of secondary phases and corresponding EDS results of alloys

图5中显示了Al-4Ni、Al-4Ni-0.5Fe和Al-4Ni-1.5Fe三种合金的Scheil凝固模拟，其中Al-4Ni的模拟结果显示，合金中存在 $\alpha$ -Al和Al<sub>3</sub>Ni的二元共晶反应，这与XRD中出现的Al<sub>3</sub>Ni化合物衍射峰的结果相吻合。对于Al-4Ni-0.5Fe合金，图5中的相析出模拟表明，合金在凝固过程中存在Al<sub>3</sub>Ni与 $\alpha$ -Al的二元共晶反应以及Al<sub>3</sub>Ni、Al<sub>9</sub>NiFe（即为模拟结果中的Al<sub>9</sub>M<sub>2</sub>相）与 $\alpha$ -Al的三元

共晶反应，最终形成了相应的（ $\alpha$ -Al+Al<sub>3</sub>Ni）二元共晶和（ $\alpha$ -Al+Al<sub>3</sub>Ni+Al<sub>9</sub>NiFe）三元共晶。Al-4Ni-1.5Fe合金的Scheil模拟结果显示，合金凝固时先析出了Al<sub>9</sub>NiFe初生相，这与微观组织结果中Al-4Ni-1.5Fe合金中的板条初生相对应。随后，该合金析出了Al<sub>9</sub>NiFe与 $\alpha$ -Al的二元共晶以及Al<sub>3</sub>Ni、Al<sub>9</sub>NiFe与 $\alpha$ -Al的三元共晶。

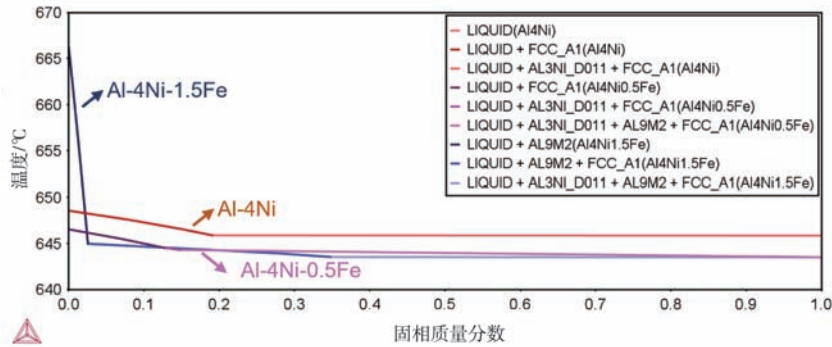


图5 Al-4Ni、Al-4Ni-0.5Fe和Al-4Ni-1.5Fe合金Scheil凝固计算结果  
Fig. 5 Scheil simulation results of Al-4Ni, Al-4Ni-0.5Fe and Al-4Ni-1.5Fe alloys

### 2.2 Al-4Ni-xFe 物理性能

图6a和6b是Al-4Ni-xFe合金的热导率和电导率检测结果。检测结果表明，当没有Fe元素时，Al-4Ni合金的热导率和电导率的测量值分别为200 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>和31 MS·m<sup>-1</sup>，处于较高的水平。随着Fe含量的增

加，Al-4Ni-xFe合金的热导率和电导率均减小。总体来说，Fe含量在0~0.5%的范围内，合金热导率和电导率的下降较缓慢。当Fe含量从0.5%到0.75%（形成初生相）时，电导率下降会突然加快，随后下降缓慢。图6c为实际测试的Al-4Ni-xFe合金基体Al中的Fe元素固溶

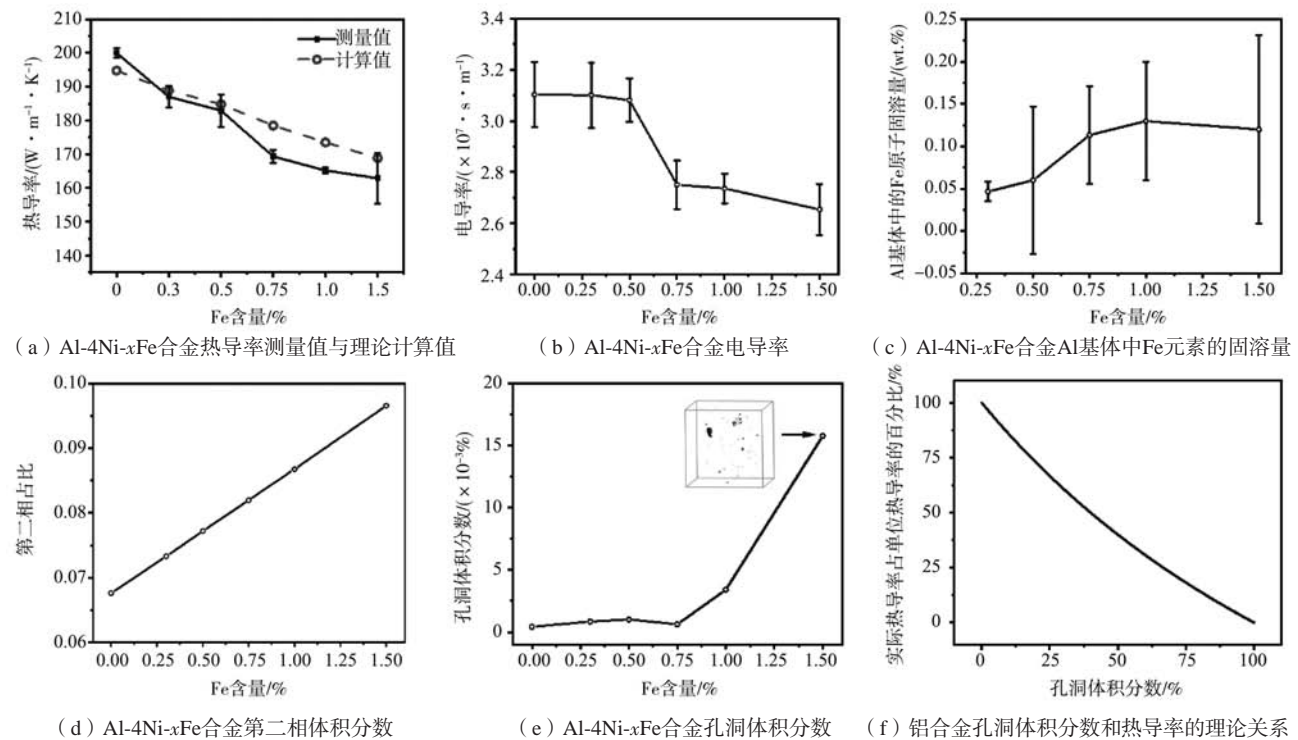


图6 铁含量对合金物理性能的影响  
Fig. 6 Effect of iron contents on physical properties of alloys

量。虽然平衡条件下Fe在铝中的固溶度很低，但在本文的实际凝固条件下，基体中的固溶量处于过饱和状态，超过了Fe在铝中的极限固溶度。因而，当合金中的Fe添加量从0到0.75%时，对应的样品中，Fe溶质在铝固溶体中的固溶量不断增加，逐渐超过平衡相图中Fe在铝中的极限固溶度0.05%，并不断接近新的极限固溶度。当合金中的Fe含量超过1.0%以后，相应样品中Fe溶质在铝中的固溶量达到了新的极限固溶度（高于0.05%），因而趋于平缓。图6d为采用Thermo-Calc软件计算得到的不同Al-4Ni-xFe合金中第二相体积分数。可以看到，随着Fe含量的增加，第二相体积分数不断增加。

根据合金中的各元素固溶量和第二相体积分数的数据，通过Matthiessen定律、复合材料的有效介质理论和Wiedemann-Franz定律<sup>[18]</sup>，可计算各个合金的热导率。在Matthiessen定律中，合金电阻率主要由基本电阻率以及残余电阻率组成，其中残余电阻率主要受溶质原子、第二相、晶界、位错、孔洞等多因素影响。在铸造铝合金中，电阻率/热导率的主要影响因素为溶质原子、第二相以及孔洞<sup>[19]</sup>。首先仅讨论Al-4Ni-xFe热导率与溶质原子和第二相的关系。考虑到第二相之间存在相互作用，Matthiessen定律仅仅只用来计算铝基体的热导率，基体与第二相的总热导率采用有效介质理论计算。因此，铝合金相应的电阻率和热导率可以用以下公式表示。

$$\rho_{Al}(T, c_1, \dots, c_n, s_1, \dots, s_n) = \rho_p + \sum_i \rho_i' c_i' \quad (2)$$

$$\lambda_{Al} = \frac{L_0 T}{\rho_{Al}} \quad (3)$$

$$V_s \frac{\lambda_s - \lambda_A}{\lambda_s + 2\lambda_A} + (1 - V_s) \frac{\lambda_{Al} - \lambda_A}{\lambda_{Al} + 2\lambda_A} = 0 \quad (4)$$

式中： $\rho_{Al}$ 表示铝基体的总电阻率， $\rho_p$ 表示铝合金的基本电阻率， $\rho_i'$ 表示增加单位百分比溶质原子带来的平均电阻率的增加， $c_i'$ 表示合金元素在固溶体中的含量； $\lambda_{Al}$ 表示铝基体的热导率， $L_0$ 为洛伦兹常数， $T$ 为温度。其中式（3）中热导率的声子项忽略不计。 $\lambda_A$ 表示铝合金的热导率， $\lambda_s$ 表示第二相的热导率， $V_s$ 表示第二相体积分数。

根据参考文献[20]中的数据，可以计算得到图6a中的计算热导率值，通过与实测热导率对比，计算值与试验值较为吻合。

孔洞对热导率的影响见图6e，随着Fe含量的增加，合金孔隙率的体积分数增加，特别是Al-4Ni-1.5Fe合金，孔洞体积分数急剧上升。这是因为Al-4Ni-1.5Fe合金为过共晶状态，且具有最高的固液温度区间，合金在凝固时更倾向于糊状凝固，外加凝固后期形成了大量的层片状Al<sub>9</sub>NiFe相彼此搭接，导致金属液补缩困

难。

一般来说，合金中的孔洞可以视为分散相，其对热导率的贡献可以通过Maxwell-Eucken复合材料导热模型计算，相应的公式如下所示：

$$\lambda = \lambda_A \left[ \frac{\lambda_p + 2\lambda_A - 2V_p(\lambda_A - \lambda_p)}{\lambda_p + 2\lambda_A + V_p(\lambda_A - \lambda_p)} \right] \quad (\lambda_p < \lambda_A) \quad (5)$$

式中： $\lambda$ 为合金总热导率， $\lambda_p$ 表示孔洞的热导率（约为0），而 $\lambda_A$ 设为1， $V_p$ 表示孔洞的体积分数。

图6f为孔洞体积分数与热导率成负相关的关系。可以看到，在Al-4Ni-1.5Fe合金中，如此微小的孔洞体积分数无法显著降低总热导率。因此，可以忽略孔洞对热导率的影响。以上的结果表明，Fe元素在基体中的固溶量和析出相（尤其是Al<sub>9</sub>NiFe相）的含量与形貌应为影响Al-4Ni-xFe合金热导率的主要因素。当无Fe元素时，铝基体固溶度主要由Ni元素贡献，第二相为纤维状共晶Al<sub>3</sub>Ni，电子可在初生 $\alpha$ -Al和纤维间隙的共晶 $\alpha$ -Al间传导，散射程度最低，热导率和电导率最高。当添加Fe元素但未形成初生相时，Fe的添加引入了更多的溶质原子，且三元共晶组织中出现了层片状Al<sub>9</sub>NiFe组织，对电子散射的作用加强，热导率和电导率有所下降。当Fe含量进一步增加，基体中的固溶度进一步增强，且在合金内部形成板片状初生相，大大阻碍了电子传导，热导率和电导率也随之继续下降。具体的示意图如图7所示。

### 2.3 Al-4Ni-xFe 力学性能

图8是Al-4Ni-xFe合金的力学性能。随着Fe含量的增加，Al-4Ni-xFe合金的屈服强度增加而伸长率下降。其中，当Fe含量超过0.75%时，伸长率迅速下降。随着Fe含量从0增加到0.5%，抗拉强度提高。然而，随着Fe含量的继续增加，合金的抗拉强度不断下降。

图9是Al-4Ni-0.5Fe和Al-4Ni-1.5Fe合金的断口形貌。图9a和9d分别展示了Al-4Ni-0.5Fe合金中的平整断口表面以及Al-4Ni-1.5Fe合金中的曲折断口表面。图9b为Al-4Ni-0.5Fe合金放大后的断口形貌，可以明显看到 $\alpha$ -Al初窝和共晶初窝，其中 $\alpha$ -Al初窝尺寸相对较大，可在几微米到十几微米不等，而共晶初窝的尺寸则相对很小，基本在纳米级。大量初窝也表明，合金在断裂的过程中变形协调能力较强，塑性较高。在图9c中，可以观察到层片状共晶上的微裂纹。对于Al-4Ni-1.5Fe合金，图9e则出现了大尺寸缩松，其大小可达数百微米，可作为Al-4Ni-1.5Fe合金断裂时的裂纹源。图9f是合金中超过10微米的断裂的初生Al<sub>9</sub>NiFe相，可以看到裂纹横穿了整个相，裂纹的扩展路径在该相内出现了分叉。板片状初生Al<sub>9</sub>NiFe相为脆性相，其与Al之间的变形协调性较差，造成了其内部更大的应力集

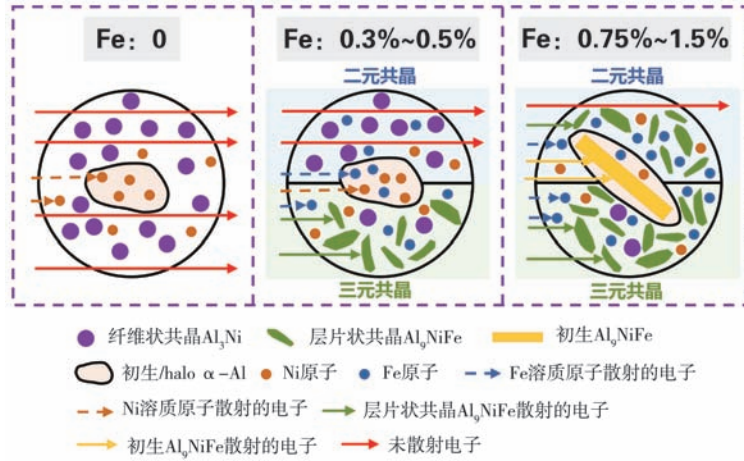


Fig. 7 Schematic illustration of electron transport in Al-4Ni-xFe alloys

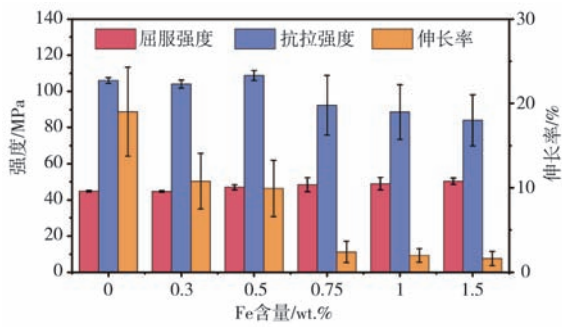


图8 Al-4Ni-xFe合金力学性能

Fig. 8 Mechanical properties of Al-4Ni-xFe alloys

中。因此，裂纹更容易向脆性相 $Al_9NiFe$ 相延伸和扩展并发展出次级裂纹，加速合金的失效和断裂。与初生 $Al_9NiFe$ 相相比，细小的共晶 $Al_9NiFe$ 相在断裂过程中产生更小的应力集中，在周围纤维状共晶 $Al_3Ni$ 的作用下，共晶 $Al_9NiFe$ 相也更加容易与周围组织协调变形，从而可以抑制主裂纹的扩展，保证合金具有较高的伸长率。以上结果显示，为了保证较高的伸长率和适当的强度，应避免合金中出现板片状初生 $Al_9NiFe$ 相。

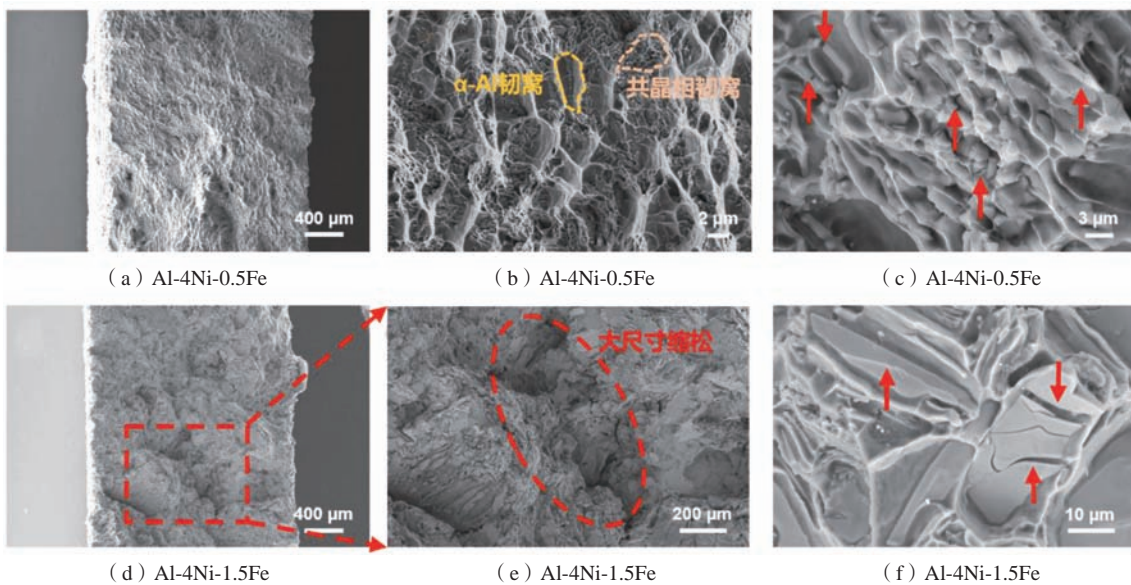


图9 合金的断口形貌

Fig. 9 Fracture morphology of alloys

### 3 结论

(1) Al-4Ni合金的微观组织是初生 $\alpha$ -Al和( $\alpha$ -Al+Al<sub>3</sub>Ni)共晶。随着Fe元素增加至0.5%，初生相仍为 $\alpha$ -Al，共晶组织变为( $\alpha$ -Al+Al<sub>3</sub>Ni)二元共晶和( $\alpha$ -Al+Al<sub>3</sub>Ni+Al<sub>9</sub>NiFe)三元共晶。当Fe含量超过0.75%，初生相为Al<sub>9</sub>NiFe，同时形成halo铝枝晶，共晶组织变为( $\alpha$ -Al+Al<sub>9</sub>NiFe)二元共晶和( $\alpha$ -Al+Al<sub>3</sub>Ni+Al<sub>9</sub>NiFe)三元共晶。

(2) 当Fe含量增加时，Al-4Ni-xFe合金的热导率

和电导率呈下降趋势，这主要与合金 $\alpha$ -Al基体中Fe原子的固溶量和Al<sub>9</sub>NiFe第二相的含量和形貌相关，与孔洞关系不大。

(3) 随着Fe的增加，Al-4Ni-xFe的屈服强度不断增加，伸长率先缓慢下降，当Fe含量超过0.75%后伸长率急剧降低。

(4) Al-4Ni-0.5Fe合金的热导率和伸长率较高，强度适中，具有最佳的综合性能。

#### 参考文献:

- [1] YANG Z, HE X, LI B, et al. Influence of Si, Cu, B, and trace alloying elements on the conductivity of the Al-Si-Cu alloy [J]. *Materials*, 2022, 15 (2): 426.
- [2] KUMAR L, JANG J C, YU H, et al. Effect of secondary phase on mechanical and thermal conductivity of Al-Si-xFe-Mg-yCu-Mn die casting alloys [J]. *Materials Letters*, 2022, 314: 131889.
- [3] CHEN F, ZHAO H, ZHU G, et al. Experimental and numerical analysis of flow behavior and particle distribution in A356/SiC<sub>p</sub> composite casting [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, 68: 39-47.
- [4] SHIN J, KO S, KIM K. Development and characterization of low-silicon cast aluminum alloys for thermal dissipation [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 644: 673-686.
- [5] 孙玉兰, 张宗巧. 压铸铝合金机油泵体浇注系统工艺优化 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2015, 35 (1): 37-39.
- [6] KOTIADIS S, ZIMMER A, ELSAYED A, et al. High electrical and thermal conductivity cast Al-Fe-Mg-Si alloys with Ni additions [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2020, 51 (8): 4195-4214.
- [7] RAVI K R, PILLAI R M, AMARANATHAN K R, et al. Fluidity of aluminum alloys and composites: A review [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 456 (1): 201-210.
- [8] GAN J, HUANG Y, WEN C, et al. Effect of Sr modification on microstructure and thermal conductivity of hypoeutectic Al-Si alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30 (11): 2879-2890.
- [9] WEN C, GAN J, LI C, et al. Comparative study on relationship between modification of Si phase and thermal conductivity of Al-7Si alloy modified by Sr/RE/B/Sb elements [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2021, 15 (1): 194-205.
- [10] GAN J, HUANG Y, DU J, et al. Synchronous improvement in thermal conductivity and mechanical properties of Al-7Si-0.6Fe-0.5Zn cast alloy by B/La/Sr composite modification [J]. *Materials Research Express*, 2020, 7 (8): 86501.
- [11] LIU Y, ZHANG Y, LIU W, et al. Enhanced mechanical properties and thermal conductivity of high-pressure die-cast AlMg<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>MnZr alloy by controlling the externally solidified crystals [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 306: 117645.
- [12] PALANIVEL S, KUEHMANN C, ROBERT S J, et al. Aluminium alloys for die casting. WO2020028730 [P]. 2020-02-06.
- [13] OSÓRIO W R, PEIXOTO L C, CANTÉ M V, et al. Microstructure features affecting mechanical properties and corrosion behavior of a hypoeutectic Al-Ni alloy [J]. *Materials & Design*, 2010, 31 (9): 4485-4489.
- [14] SUWANPREECHA C, PANDEE P, PATAKHAM U, et al. New generation of eutectic Al-Ni casting alloys for elevated temperature services [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 709: 46-54.
- [15] SUWANPREECHA C, RAKHMUNOV J U, CHANKITMUNKONG S, et al. Ambient- and elevated temperature properties of Sc- and Zr-modified Al-6Ni alloys strengthened by Al<sub>3</sub>Ni microfibers and Al<sub>3</sub>(Sc, Zr) nanoprecipitates [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 841: 142963.
- [16] WANG K, HU S, ZHONG Y, et al. Effects of trace ytterbium addition on microstructure, mechanical and thermal properties of hypoeutectic Al-5Ni alloy [J]. *Journal of Rare Earths*, 2022, 40 (8): 1305-1315.
- [17] BIAN Z, LIU Y, DAI S, et al. Regulating microstructures and mechanical properties of Al-Fe-Ni alloys [J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2020, 30 (1): 54-62.
- [18] OLAFSSON P, SANDSTROM R, KARLSSON Å. Comparison of experimental, calculated and observed values for electrical and thermal

conductivity of aluminium alloys [J]. Journal of Materials Science, 1997, 32 ( 16 ) : 4383–4390.

- [19] 刘文憬, 李元东, 宋赵熙, 等. Sr+Er复合变质对AlSi10MnMg合金微观组织、导热及力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2023, 37 ( 6 ) : 131–137.
- [20] LUMLEY R N, DEEVA N, LARSEN R, et al. The role of alloy composition and T7 heat treatment in enhancing thermal conductivity of aluminum high pressure die castings [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44 ( 2 ) : 1074–1086.

---

## Effect of Fe Contents on Microstructure, Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Hypoeutectic Al-Ni Alloy

LIU Yi-xian<sup>1</sup>, LIU Yong-chang<sup>2,3</sup>, WAN Ao-xiang<sup>1</sup>, WANG Peng-zhan<sup>1</sup>, SARIA Akhtar<sup>1</sup>, GE Su-jing<sup>2,3</sup>, HUO Chen-ming<sup>2,3</sup>, YUAN Gao-li<sup>2,3</sup>, ZHANG Yi-cheng<sup>2,3</sup>, XIONG Shou-mei<sup>1,4</sup>

(1. School of Materials Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Hebei New Lizhong Nonferrous Metals Group Co., Ltd., Baoding 071100, Hebei, China; 3. Hebei Light Metal Alloy Material Technology Innovation Center, Baoding 071100, Hebei, China; 4. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Beijing 100084, China)

### Abstract:

Al-Ni alloy is a widely used high-pressure die-cast aluminum alloy system for high thermal conductivity applications, and the influence of Fe content on the thermal conductivity of Al-Ni alloy is very important. In this paper, the effect of different Fe contents on microstructure, thermal conductivity and mechanical properties of hypoeutectic Al-4Ni alloys were studied. The results showed that the microstructure in Al-4Ni alloy was primary  $\alpha$ -Al and ( $\alpha$ -Al+Al<sub>3</sub>Ni) eutectic. As the Fe content increased to 0.5%, the eutectic microstructure became ( $\alpha$ -Al+Al<sub>3</sub>Ni) binary eutectic and ( $\alpha$ -Al+Al<sub>3</sub>Ni+Al<sub>9</sub>NiFe) ternary eutectic. When the Fe content exceeded 0.75%, the primary Al<sub>9</sub>NiFe phase and halo aluminum dendrite were formed, and the eutectic microstructure became ( $\alpha$ -Al+ Al<sub>9</sub>NiFe) binary eutectic and ( $\alpha$ -Al+Al<sub>3</sub>Ni+Al<sub>9</sub>NiFe) ternary eutectic. With the addition of Fe, thermal conductivity of Al-4Ni-*x*Fe alloy declined, which was mainly related to the solubility of iron in the  $\alpha$ -Al matrix of the alloy and the content and morphology of the Al<sub>9</sub>NiFe phase. In terms of mechanical properties, with the increase of Fe, yield strength of Al-4Ni-*x*Fe increased, and the elongation slowly decreased first and then dropped sharply. This was mainly due to the formation of Al<sub>9</sub>NiFe primary phase in the alloy, which accelerated the crack propagation. Above all, Al-4Ni-0.5Fe alloy with a good trade-off on thermal conductivity and mechanical properties had the best comprehensive property.

### Key words:

Al-Ni alloy; iron; microstructure; thermal conductivity; mechanical properties