

Al-Ni-Fe 系铸态合金中的准晶相 *

羌建兵¹ 王英敏¹ 王德和¹ 董闯^{1,2}

(1. 大连理工大学 2. 大连理工大学三束材料改性国家重点实验室)

摘 要 系统研究了 $Al_{72.5}Fe_{14.5}Ni_{13}$ 和 $Al_{71}Fe_5Ni_{24}$ 铸态合金的相组成, 发现其中分别存在 D - $Al_{72.6}Fe_{14.6}Ni_{12.8}$ 和 D' - $Al_{70.5}Fe_{10}Ni_{19.5}$ 两种十次准晶, 它们各自与 AlFe 和 AlNi 二元十次准晶相关. 实验结果与三元准晶相图的电子浓度特征吻合, 说明三元准晶相图的电子浓度特征对确定三元准晶的理想成分和探索准晶新成分有一定的指导作用.

关键词 材料科学基础学科, 准晶, 电子浓度, Al-Ni-Fe 合金, 三元相图

分类号 O753

文章编号 1005-3093(2003)01-0067-07

Quasicrystals in as-cast Al-Ni-Fe alloys

QIANG Jianbing^{1**} WANG Yingmin¹ WANG Dehe¹ DONG Chuang^{1,2}
(1. Department of Materials Engineering 2. State Key Lab. for Materials Modification by Laser,
Ion and electron Beams, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

* Supported by National Natural Science Foundation of China No.50271012.

Manuscript received Dec 25, 2001; in revised form Jul 26, 2002.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(0411)4708615,

E-mail:dong@dlut.edu.cn

ABSTRACT A structural investigation of as-cast $Al_{72.5}Fe_{14.5}Ni_{13}$ and $Al_{71}Fe_5Ni_{24}$ alloys is reported in the present paper. The former alloy mainly consists of two phases: hexagonal Al_5FeNi and decagonal quasicrystal D phase and three phases (hexagonal Al_3Ni_2 , orthorhombic Al_3Ni and decagonal quasicrystal D' phase) were found in the latter alloy. The two decagonal phases with different measured compositions, D - $Al_{72.6}Fe_{14.6}Ni_{12.8}$ and D' - $Al_{70.5}Fe_{10}Ni_{19.5}$, are corresponding to AlFe-based and AlNi-based decagonal phase, respectively. This result confirms that the electron concentration feature of ternary quasicrystalline phase diagrams is a useful empirical criterion to search for ideal ternary QC compositions.

KEY WORDS fpmidational discipline in materials science, quasicrystal, valence electron concentration, Al-Ni-Fe alloy, ternary phase diagram

稳态准晶多存在于 Al 基三元合金系中. Friedel 等^[1,2]指出, 准晶是一类电子型金属间化合物, 其稳定性取决于电子浓度因素, 费米面和布里渊区的相互作用是准晶的稳定机制. 在某一特定的电子浓度 (定义为每原子的平均价电子数 e/a), 准晶具备最低的形成能, 最稳定. 本文作者与合作者发现, 在三元准晶系相图中存在“等电子浓度线”特征^[3,4], 并定义了准晶类似相; 最近又发现, 在相图上, 三元准晶位于二元准晶和第三元组元构成的“准晶变电子浓度线”上. 在三元准晶相图中由“准晶等电子浓度线”和“准晶变电子浓度线”构成的电子浓度特征可用于优化和确定三元准晶的理想成分^[5]. 蔡安邦 (A.P.Tsai) 等用急冷甩带法在 Al-Fe-Ni 合金系中

* 国家自然科学基金资助项目 No.50271012. 2001 年 12 月 25 日收到初稿; 2002 年 7 月 26 日收到修改稿.

本文联系人: 羌建兵, 大连市 116024, 大连理工大学材料工程系

制备出单相的 Al-Fe-Ni 十次准晶, 其成分范围为 $\text{Al}_{75\sim 70}\text{Fe}_{9\sim 21}\text{Ni}_{16\sim 9}$ (原子分数, %, 下同)^[6]. Dunlap 用相同的方法在 $\text{Al}_{75}\text{Fe}_{22\sim 9}\text{Ni}_{3\sim 16}$ 成分区间内得到系列十次准晶单相合金, 并表明在该区间中十次准晶形成的最佳成分在 $\text{Al}_{75}\text{Fe}_{26}\text{Ni}_9$ 处^[7]. 最近, 有文献报道在 900 °C 发现稳定的十次准晶 $\text{Al}_{71}\text{Fe}_5\text{Ni}_{24}$, 此相在 800 °C 以下发生分解^[8]. 显然, 在这些 Al-Ni-Fe 十次准晶中, $\text{Al}_{71}\text{Fe}_5\text{Ni}_{24}$ 成分的电子浓度 ($e/a=2.03$) 与 Al 基三元准晶的理想电子浓度值 ($e/a=1.86$) 偏离较大. 为明确 Al-Fe-Ni 三元准晶的形成区域, 本文以两种典型的合金成分 ($\text{Al}_{72.5}\text{Fe}_{14.5}\text{Ni}_{13}$ 和 $\text{Al}_{71}\text{Fe}_5\text{Ni}_{24}$) 为对象, 研究其铸态合金中的相结构及成分.

1 实 验 方 法

以纯度高于 99% 的 Al, Ni, Fe 为原料在非自耗真空电弧炉中熔炼名义成分为 $\text{Al}_{72.5}\text{Fe}_{14.5}\text{Ni}_{13}$ 和 $\text{Al}_{71}\text{Fe}_5\text{Ni}_{24}$ 合金, 反复熔炼多次, 以保证合金成分的均匀性, 在水冷铜壁坩埚中冷却得到合金铸锭. 铸态合金的相形貌及成分分析在 JEOL-5600LV 型扫描电镜上进行, 用 Shimadzu XRD-6000 X 射线衍射仪 ($\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 0.15406 \text{ nm}$) 测定合金的相组成, 并在 JEOL-100FX 型透射电镜上完成铸态合金粉末样品的选区电子衍射 (SAED) 分析.

2 结 果 与 讨 论

根据 X 射线衍射谱, 铸态合金 $\text{Al}_{72.5}\text{Fe}_{14.5}\text{Ni}_{13}$ 中主要有六角 Al_5FeNi 和十次准晶相 D -AlFeNi, 与透射电镜的观测结果一致. 图 1a, d, e 分别为 D -AlFeNi 准晶的十次轴和 P 型及 D 型二次轴的衍射花样, 其中十次轴的衍射图显示出鲜明的十次准晶特征 (图 1a). 通过双倾技术可得到图 1 所示的全部衍射花样, 它们之间的倾转角在图 1 中分别标出. 十次准晶具有 P 型和 D 型两种二次轴的特征电子衍射花样, 与十次轴间的夹角都为 90° , 而相邻 P 型和 D 型衍射谱之间的夹角为 18° , 并在沿十次轴作倾转时交替出现. 如果考虑到图 1(f) 中所示的漫散射, 该十次准晶十次轴方向的周期为 0.818 nm (经过 X 射线衍射数据的修正), 与 X 射线衍射结果完全一致. 十次准晶 D -AlFeNi 的衍射峰可以用 Ishihara^[9] 指数标出. 在铸态合金 $\text{Al}_{72.5}\text{Fe}_{14.5}\text{Ni}_{13}$ 中 Al_5FeNi 相与十次准晶 D -AlFeNi 共生, 但没有固定的取向关系. 大量十次准晶 D -AlFeNi 在 Al_5FeNi 相的周围生成 (图 2), 根据能谱, Al_5FeNi 相和 D -AlFeNi 的平均化学成分分别为 $\text{Al}_{70}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_{13}$ 和 $\text{Al}_{72.6}\text{Fe}_{14.6}\text{Ni}_{12.8}$. 在十次准晶 D -AlFeNi 相内, 还有少量的黑色相, 由能谱测得其成分为 $\text{Al}_{77}\text{Fe}_{5.5}\text{Ni}_{17.5}$. 根据 Pearson 手册^[10], Al_5FeNi 相是单斜相, 其点阵参数为 $a=1.5437 \text{ nm}$, $b=0.9109 \text{ nm}$, $c=1.243 \text{ nm}$, $\beta=107.66^\circ$, Ellner^[11] 等用 X 射线粉末法重新测定了成分为 $\text{Al}_{71.4}\text{Fe}_{14.3}\text{Ni}_{14.3}$. (原子分数, %) 的 Al_5FeNi 相的晶体结构, 发现它与 Al_5Co_2 (hP28) 同型, 点阵常数为: $a=0.7693 \text{ nm}$, $c=0.7657 \text{ nm}$. 本文的结果与后者一致, 铸态合金 $\text{Al}_{72.5}\text{Fe}_{14.5}\text{Ni}_{13}$ 中的 Al_5FeNi 相为 Al_5Co_2 型六角相, 其点阵常数为: $a=0.769 \text{ nm}$, $c=0.767 \text{ nm}$.

X 射线衍射谱的标定结果表明, 铸态合金 $\text{Al}_{71}\text{Fe}_5\text{Ni}_{24}$ 中主要有六角 Al_3Ni_2 相, Al_3Ni 正交相和十次准晶 D' -AlFeNi (用 D' 以区别于 $\text{Al}_{72.5}\text{Fe}_{14.5}\text{Ni}_{13}$ 合金中的 D -AlFeNi 准晶) 相. Al_3Ni_2 是 CsCl 型结构的超结构空位有序相, 多见于 Al-Cu-Fe, Al-Cu-Co, Al-Pd-Mn, Al-Cu-Fe-Cr 等准晶系中, 与准晶关系密切. 作者与合作者曾从电子浓度和晶体结构角度证实它是准晶类似相^[12]. 在 $\text{Al}_{71}\text{Fe}_5\text{Ni}_{24}$ 合金中, Al_3Ni_2 是主要生成相, 能谱探测结果表明该 Al_3Ni_2 相的化学组成接近 $\text{Al}_{64}\text{Fe}_{3.5}\text{Ni}_{32.5}$, 含有少量的 Fe 元素. 六角 Al_3Ni_2 相的点阵常数为 $a=0.404 \text{ nm}$, $c=0.489 \text{ nm}$, 与文献 [13] 结果稍有不同, 这是由于 Al_3Ni_2 中固溶了 3.5% (原子分数) Fe 的缘故. 由图 3 可见,

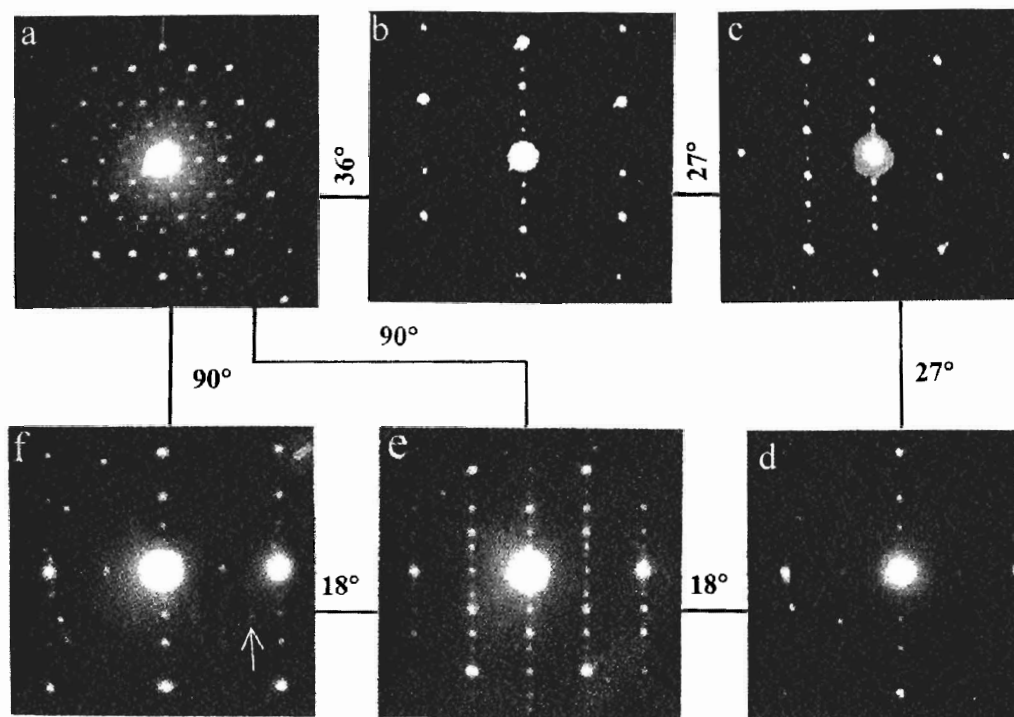


图 1 十次准晶 $D\text{-Al}_{72.6}\text{Fe}_{14.6}\text{Ni}_{12.8}$ 不同倾转角的选区电子衍射花样

Fig.1 Selected area electron diffraction (SAED) patterns of $D\text{-Al}_{72.6}\text{Fe}_{14.6}\text{Ni}_{12.8}$ taken with incident electron beam parallel to various axis, tilting angles between these patterns are given, more details see text (a), (b), (c), (d), (e), (f)

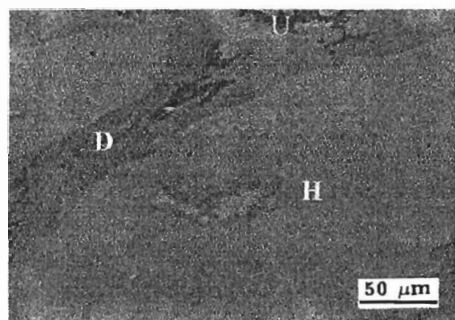


图 2 铸态合金 $\text{Al}_{72.5}\text{Fe}_{14.5}\text{Ni}_{13}$ 的扫描电镜形貌

Fig.2 SEM image of as-cast $\text{Al}_{72.5}\text{Fe}_{14.5}\text{Ni}_{13}$ alloy, D $D\text{-Al}_{72.6}\text{Fe}_{14.6}\text{Ni}_{12.8}$ phase; H hexagonal Al_5FeNi phase (Al_5Co_2 type); U unknown phase

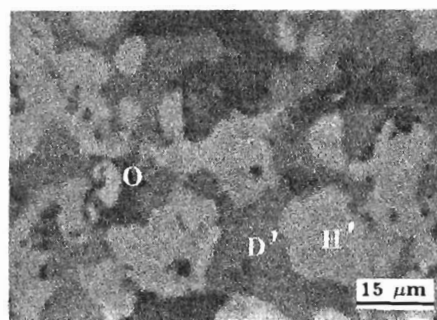


图 3 铸态合金 $\text{Al}_{71}\text{Fe}_5\text{Ni}_{24}$ 的扫描电镜形貌

Fig.3 SEM image of as-cast $\text{Al}_{71}\text{Fe}_5\text{Ni}_{24}$ alloy, D' decagonal $D' - \text{Al}_{70.83}\text{Fe}_{9.83}\text{Ni}_{19.34}$ phase; O orthorhombic phase $\text{Al}_{74.8}\text{Fe}_{1.5}\text{Ni}_{23.7}$ (Al_3Ni type); H' hexagonal $\text{Al}_{64}\text{Fe}_{3.5}\text{Ni}_{32.5}$ phase (Al_3Ni_2 type)

与 Al_3Ni_2 相相邻, 存在大量的十次准晶 D' - AlFeNi 相, 其能谱测得的平均成分为 $\text{Al}_{70.5}\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{19.5}$. 图 4 表明, 十次准晶 D' - AlFeNi 相在十次轴方向的周期为 $c=0.409$ nm. 与铸态合金 $\text{Al}_{72.5}\text{Fe}_{14.5}\text{Ni}_{13}$ 中的 D - AlFeNi 准晶相比, D' 为富 Ni 贫 Fe 相, 相应的, 十次准晶 D' 相的准周期常数 ($a_d=0.712$ nm) 稍小于 D 相 ($a_d=0.713$ nm), 这一趋势在 Al-Ni-Co 准晶系中也有报道^[14], 同时, D' 相在十次轴方向的点阵常数仅为 D 相的一半.

在十次准晶 D' - AlFeNi 相内, 发现了成分为 $\text{Al}_{74.8}\text{Fe}_{1.5}\text{Ni}_{23.7}$ 的 Al_3Ni 正交相 (图 3), 除 Al_3Ni_2 相, Al_3Ni 正交相和十次准晶 D' - AlFeNi 外, 透射电镜分析结果表明还有 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 型晶体相存在, 该相常与 Al_3Ni_2 相伴生, 经测定, 它们之间的主要取向关系为: $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4(010)//\text{Al}_3\text{Ni}_2$

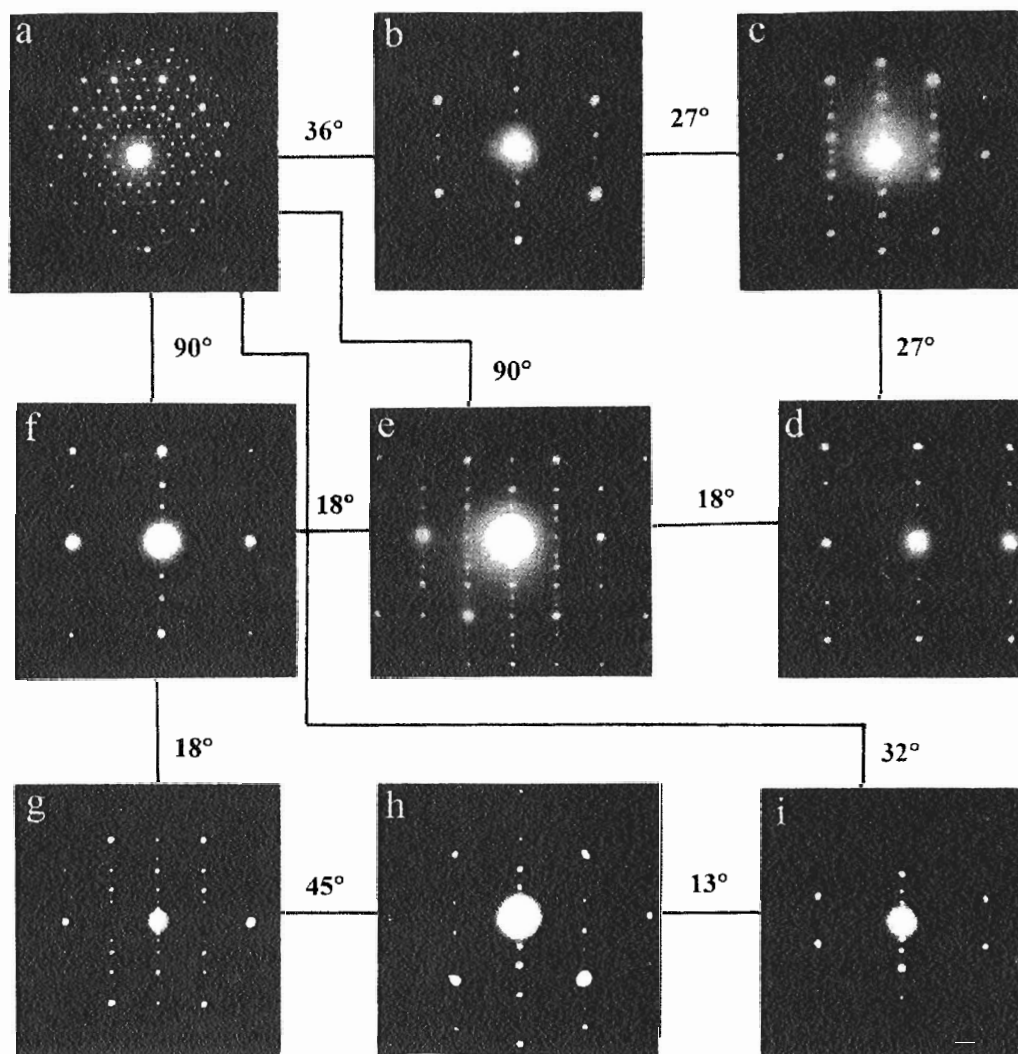


图 4 十次准晶 D' - $\text{Al}_{70.83}\text{Fe}_{9.83}\text{Ni}_{19.34}$ 的选区电子衍射花样

Fig.4 SAED patterns arranged in a stereo manner for D' - $\text{Al}_{70.83}\text{Fe}_{9.83}\text{Ni}_{19.34}$ phase. tilting angles between these patterns are given

(012); $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4[506]//\text{Al}_3\text{Ni}_2[121]$.

在图 5 中标出了本文中各相的成分区域. 按 Al, Ni, Fe 的价电子贡献分别为 $N_{\text{Al}} = 3$, $N_{\text{Ni}} = 0$ 和 $N_{\text{Fe}} = -2$ 计算^[15], 六角相 Al_5FeNi , Al_3Ni_2 和单斜 $\lambda\text{-Al}_{13}\text{Fe}_4$ 相的价电子浓度值基本相同 (表 1^[6~8,13,14,16~19]), 在相图上它们一起位于于同一等电子浓度线 ($e/a=1.86$) 附近.

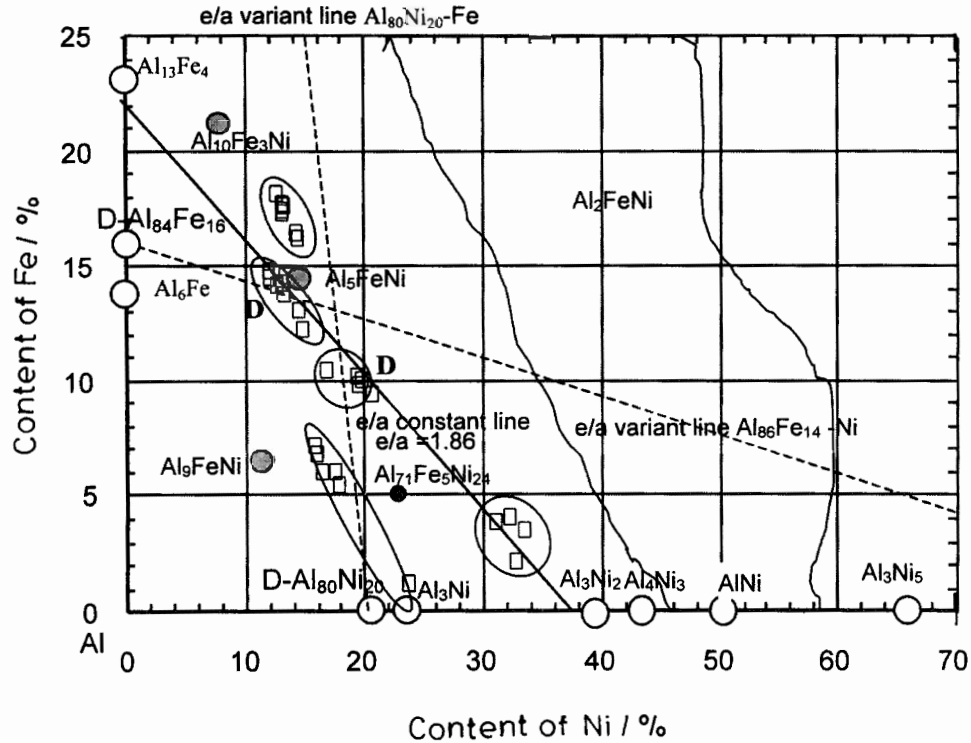


图 5 Al-Fe-Ni 三元相图

Fig.5 Composition chart of Al-Fe-Ni alloy system, D and D' indicate $D\text{-Al}_{72.6}\text{Fe}_{14.6}\text{Ni}_{12.8}$ and $D'\text{-Al}_{70.83}\text{Fe}_{9.83}\text{Ni}_{19.34}$ phase. The symbol "□" marks the measured phase compositions in this work

Al-Fe-Ni 合金系中有十次准晶 $D\text{-Al}_{36}\text{Fe}_{14}$ ^[16] 和 $D\text{-Al}_{80}\text{Ni}_{20}$ ^[15], 在十次轴方向的周期分别为 1.6 和 0.4 nm, 依据三元 Al 基准晶相图的电子浓度特征, 二元准晶可以通过适当合金元素的加入, 使自身的价电子浓度值接近理想值 1.86, 变得稳定. 因此, Al-Fe-Ni 系应有两种相对稳定的三元准晶, 分别对应 $D\text{-Al}_{86}\text{Fe}_{14}$ 和 $D\text{-Al}_{80}\text{Ni}_{20}$ 的二元准晶. 加入 Ni 可使二元准晶 $D\text{-Al}_{86}\text{Fe}_{14}$ 的电子浓度逐步逼近理想值, 在 $\text{Al}_{72.5}\text{Fe}_{14.5}\text{Ni}_{13}$ 处得到稳定; 而 $D\text{-Al}_{80}\text{Ni}_{20}$ 基准晶的理想成分应为 $\text{Al}_{70.5}\text{Fe}_{12}\text{Ni}_{17.5}$. 这两种准晶的理想成分分别位于准晶变电子浓度线 $\text{Al}_{86}\text{Fe}_{14}\text{-Ni}$ 和 $\text{Al}_{80}\text{Ni}_{20}\text{-Fe}$ 与准晶等电子浓度线 ($e/a=1.86$) 的交点处.

本文的结果与上述预测相当吻合. 在铸态合金 $\text{Al}_{72.5}\text{Fe}_{14.5}\text{Ni}_{13}$ 中生成的十次准晶 $D\text{-Al}_{72.6}\text{Fe}_{14.6}\text{Ni}_{12.8}$ 的成分与理想成分 $\text{Al}_{72.5}\text{Fe}_{14.5}\text{Ni}_{13}$ 非常接近. 根据 Tanaka 等人的会聚束研究结果^[17,20], 十次准晶 $\text{Al}_{70}\text{Ni}_{10-x}\text{Fe}_{20-x}$ ($0 \leq x \leq 7$) 的空间群为非中心对称空间群 $P\bar{1}0m2$, 而

表 1 Al-Fe-Ni 合金系中富 Al 相的晶体结构参数数据
Table 1 Structural data of Al-rich phases in Al-Fe-Ni alloy system

Phase	Crystal structure parameters /nm	Chemical composition (atomic fraction,%)	Electron concentration e/a
D-AlNi	Decagonal, P10 ₅ /mcm, 0.4	Al ₈₀ Ni ₂₀ ^[15] Al _{76~70} Ni _{24~30} ^[13]	2.40 2.28~2.10
Al ₃ Ni ₂	hP5, P $\bar{3}$ m1, (0.40363, 0.49004), $\gamma=120^\circ$	Al ₆₁ Ni ₃₉	1.83
Al ₃ Ni	oP16, Pnma, (0.66144, 0.73662, 0.48112)	Al ₇₅ Ni ₂₅	2.25
D-AlFe	Decagonal, P10mc, 1.6	Al ₈₆ Fe ₁₄ ^[16]	2.30
μ -Al ₅ Fe ₂	oC15, Cmcm, (0.7675, 0.6403, 0.4203)	Al ₇₃ Fe ₂₇ Al _{71.5} Fe _{28.5}	1.65 1.58
Al ₃ Fe	mC102, C2/m, (1.5489, 0.80831, 1.2476), $\beta=107.72^\circ$	Al _{76.5} Fe _{23.5}	1.83
Al ₆ Fe	oC28, Cmcm, (0.7437, 0.6492, 0.8788)	Al ₈₆ Fe ₁₄	2.30
D-AlFeNi	decagonal phase, 0.4	Al ₇₁ Fe ₅ Ni ₂₄ ^[8] Al _{75~70} Fe _{9~21} Ni _{16~9} ^[6] Al ₇₅ Fe _{22~9} Ni _{3~16} ^[7] Al ₇₀ Fe _{20~13} Ni _{10~17} ^[17] Al ₇₀ Fe _{13~10} Ni _{17~20} ^[17]	2.05 1.68~2.07 1.81~2.07 1.70~1.84 1.84~1.90
	P10 \bar{m} 2, 0.4		
	P10/mmm, 0.4		
	P10 ₅ mmc, 0.4 Al _{71.6} Fe _{4.7} Ni _{23.7} ^[18]	2.054	
Al ₅ FeNi	hP28, P63/mmc, (0.7693, 0.7657)	Al _{71.4} Fe _{14.3} Ni _{14.3}	1.86
Al ₃ (Fe, Ni)	mC102, C2/m, (1.5437, 0.8109, 1.243), $\beta=107.66^\circ$	Al _{74.6} Fe _{15.4} Ni _{10.0}	1.93

7 ≤ x ≤ 10 时, 其空间群属于中心对称空间群 P10/mmm. 富 Fe 十次准晶相 D-Al_{72.6}Fe_{14.6}Ni_{12.8} 的电子衍射花样特征与文献 [20] 一致, 相应的, 其空间群应是非中心对称空间群 P10 \bar{m} 2. Yamamoto 等人认为 D-Al₈₆Fe₁₄ 准晶相空间群是 P10₅mc^[21], 也为非中心对称空间群. 在铸态合金 Al₇₁Fe₅Ni₂₄ 中十次准晶 D' 的成分为 Al_{70.5}Fe₁₀Ni_{19.5}, 与 Al₈₀Ni₂₀ 基准晶的理想成分 Al_{70.5}Fe₁₂Ni_{17.5} 接近. 同 D-Al_{72.6}Fe_{14.6}Ni_{12.8} 相比, D' 为富 Ni 相, 它的电子衍射花样有个最鲜明的特点, 就是 D 型二次轴 SAED 谱 (图 4e, g) 在十次轴方向的奇数级衍射斑点在 P 型二次轴 SAED 谱上 (图 4d, f) 出现消光. Idziak 认定这种类型的十次准晶的空间群为 P10₅/mmc (即符合上述消光规律的点群 10/mmm 的空间群为 P10₅/mmc)^[22], AlNi 十次准晶的 SAED 谱也具有同样的特征^[23]. 在结构上, D' 相与 AlNi 十次准晶密切相关.

3 结 论

铸态 Al_{72.5}Fe_{14.5}Ni₁₃ 合金的主要相为六角 Al₅FeNi 和十次准晶 D 相, 其成分分别为 Al₇₀Fe₁₇Ni₁₃ 和 Al_{72.6}Fe_{14.6}Ni_{12.8}; 铸态 Al₇₁Fe₅Ni₂₄ 合金则由 Al₃Ni₂ 型六角相与 Al₃Ni 型正交相及十次准晶相 D' 组成, 其成分分别接近 Al₆₄Fe_{3.5}Ni_{32.5}, Al_{74.8}Fe_{1.5}Ni_{23.7} 和 Al_{70.5}Fe₁₀Ni_{19.5}. 十次准晶相 D-Al_{72.6}Fe_{14.6}Ni_{12.8} 和 D'-Al_{70.5}Fe₁₀Ni_{19.5} 结构不同, 它们各自与 AlFe 和 AlNi 二元准晶相关. 这些说明三元准晶相图的电子浓度特征具有普遍性, 可用于确定三元准晶的理想成分.

参 考 文 献

- 1 J.Friedel, F.Denoyer, Les quasicristaux de AlLiCu comme alliages de Hume-Rothery, C.R.Acad, Sci.Paris, 305, 171(1987)
- 2 J.Friedel, Do metallic quasicrystals and associated Frank and Kasper phases follow the Hume-Rothery rules, Helvetica.Acta., **61**, 538(1988)
- 3 C.Dong, A.Perrot, J.M.Dubois, E.Belin, Constant e/a line and Hume-Rothery phases in Al-Cu-Fe and Al-Cu-Fe-Cr quasicrystalline systems, Mater.Sci. Forum, **150/151**, 403(1994)
- 4 C.Dong, The concept of the approximants of quasicrystals. Scripta Materialia, **33**, 239(1995)
- 5 QIANG Jianbing(羌建兵), WANG Yingmin(王英敏), CHEN Weirong(陈伟荣), DONG Chuang(董 闯), Valence electron concentration features of Al-based ternary quasicrystalline phase diagrams, Chinese Journal of Materials Research(材料研究学报), **16**(5), 500(2002)
- 6 A.P.Tsai, A.Inoue, T.Masumoto, New decagonal Al-Ni-Fe and Al-Ni-Co alloys prepared by liquid quenching, Mater.Tans.JIM., **30**, 150(1989)
- 7 R.A.Dunlap, Mossbauer effect studies of Hume-Rothery stabilization mechanisms in decagonal Al-Fe-Ni quasicrystals, Phil.Mag., **B67**, 69(1993)
- 8 U.Lemmerz, B.Grushko, C.Freiburg, M.Jansen, Study of decagonal quasicrystalline phase formation in the Al-Ni-Fe alloy system, Phil.Mag.Lett., **69**, 141(1994)
- 9 K.N.Ishihara, A.Yamamoto, Penrose patterns and related structure I: superstructure and generalized Penrose patterns, Acta. crystallogr., **A44**, 508(1988)
- 10 P.Villars, L.D.Calvert, Pearson's Handbook of Crystallographic Data for Intermetallic Phase (AEM, Metals Park, OH, 1985) p.1062
- 11 M.Ellner, T.R. hrer, Zur struktur ader tternaren phase FeNiAl₅, Z.Metallkd., **81**, 847(1990)
- 12 C.Dong, The Al₃Ni₂ structure as approximant of quasicrystals, J.Phys. I France, **5**, 625(1995)
- 13 C.Pohla, P.L.Ryder, Crystalline and quasicrystalline phases in rapidly solidified Al-Ni alloys, Acta Mater., **45**, 2155(1997)
- 14 B.Grushro, D.Holland-Moritz, High-Ni decagonal phase, Scripta Materialia, **35**, 1141(1996)
- 15 W.H.Taylor Electron configurations in some transition metal alloys, Act.Met., **2**, 684(1954)
- 16 K.K.Feng, C.Y.Yang, Y.Q.Zhou, J.G.Zhao, W.S.Zhan, B.G.Shen, Icosahedrally related deagonal quasicrystal in rapidly-cooled Al-14at.%Fe alloy, Phys.Rev.Lett., **56**, 2060(1986)
- 17 M.Tanaka, K.Tsuda, M.Terauchi, A.Fujiwara, A.P.Tsai, A.Inoue, T.Masumoto., Electron diffraction and electron microscopy study on decagonal quasicrystal on Al-Ni-Fe alloys. J. Non-cryst.Solids, **153**, 98(1993)
- 18 K.Hiraga, K.Yubuta, K.T.Park, High-resolution electron microscopy of Al-Ni-Fe decagonal quasicrystal, J.Mater.Res., **11**, 1702(1996)
- 19 X.Z.Li, K.H.Kuo, Decagonal quasicrystals with different periodicities along the tenfold axis in rapidly solidified Al-Ni alloys, Phil.Mag.Lett., **58**, 167(1988)
- 20 M.Saito, M.Tanaka, A.P.Tsai, A.Inoue, T.Masumoto, Space group determination of decagonal quasicrystals of an Al70Ni15Fe15 alloy using convergent-beam electron diffraction, Jap.J.appl.Phys., **31**, L109(1992)
- 21 A.Yamamoto, K.N.Ishihara, Penrose patterns and related structure II: decagonal quasicrystals, Acta Crystallogr., **A44**, 707(1988)
- 22 S.Idziak, P.A.Heiney, P.A.Bancel, Structure and disorder in the Al-Pd decagonal phase, Mater.Sci.Forum, **22~24**, 353(1987)
- 23 A.P.Tsai, A.Inoue, T.Masumoto, Chemical effects on periodicity and structure of decagonal phases in Al-Ni- and Al-Co-based alloys, Phil.Mag.Lett., **71**, 161(1995)