

Al-Cu-Fe 准晶相的液相面与邻近晶体相 液相面的交线投影图*

赵东山^{1,4)} 瞿文榜^{2,3)} 王仁卉^{2,3)} 沈宁福¹⁾ 石广新¹⁾ 桂嘉年^{2,3)}

1) 郑州大学材料工程学院, 郑州 450002

2) 武汉大学物理系, 武汉 430072

3) 武汉大学电子显微镜中心, 武汉 430072

4) 郑州大学物理工程学院, 郑州 450052

摘要 采用金相 (OM)、X 射线衍射 (XRD)、扫描电子显微术 (SEM) 和透射电子显微术 (TEM) 等方法, 研究了在不同温度长时间保温后水淬的 $Al_{48-60}Cu_{33-50}Fe_{0-10}$ 系列合金的凝固组织及相组成. 结果表明, Gayle 等报道的 Al-Cu-Fe 三元相图的单变量线 (液相面交线) 投影图中 β 相的液相面应当划分为 $\beta + \phi$ 两个区域. 新增的四相反应为包共晶反应 $U_8: L + \beta \rightarrow IQC + \phi$, 反应温度约为 800 °C. X 射线能谱 (EDXS) 分析表明, Ni_2Al_3 结构的 ϕ 相的成分范围是 $Al_{47.3-50.6}Cu_{45.4-48.1}Fe_{4.5-5.2}$, 而其成分中心是 $Al_{47.9}Cu_{47.1}Fe_{5.0}$.

关键词 单变量线 (液相面交线) 投影图, 凝固组织, 二十面体准晶相, ϕ 相

中图法分类号 TG111.4, O753.3 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2004)01-0014-06

POLYTHERMAL PROJECTION OF PRIMARY Al-Cu-Fe ICOSAHEDRAL QUASICRYSTAL PHASE AND THE RELATED CRYSTAL PHASE

ZHAO Dongshan^{1,4)}, QU Wenbang^{2,3)}, WANG Renhui^{2,3)}, SHEN Ningfu¹⁾, SHI Guangxin¹⁾, GUI Jianian^{2,3)}

1) Materials Engineering College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002

2) Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072

3) Center for Electron Microscopy, Wuhan University, Wuhan 430072

4) Physics Engineering College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052

Correspondent: ZHAO Dongshan, associate professor, Tel: (0371)3886130, E-mail: dszhao@zzu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 19974030)

Manuscript received 2002-12-17, in revised form 2003-03-31

ABSTRACT A series of Al-Cu-Fe alloys with compositions of $Al_{48-60}Cu_{33-50}Fe_{0-10}$ was prepared and the phase constituents in these alloys quenched from various temperatures were identified by using XRD, SEM, EDXS and EBSD attached to SEM, and TEM (including HRTEM). Compared with the polythermal projection proposed by Gayle et al, a main amendment is to divide the previous β -region into $\beta + \phi$ two regions. A new ternary reaction is the quasiperitectic at $U_8: L + \beta \rightarrow IQC + \phi$. EDXS reveals that the composition of ϕ phase with Ni_2Al_3 structure is in $Al_{47.3-50.6}Cu_{45.4-48.1}Fe_{4.5-5.2}$, and its center composition is $Al_{47.9}Cu_{47.1}Fe_{5.0}$.

KEY WORDS polythermal projection, solidification structure, icosahedral quasicrystal phase, ϕ phase

Bradly 等人^[1]早在 1939 年就报道了有关 Al-Cu-Fe 三元相图的工作, 测得 4 个复杂的、未确定的三元相, 其成分分别是: Al_6Cu_2Fe , 称为 ψ 相, Al_7Cu_2Fe , 称

为 ω 相, $Al_{10}Cu_{10}Fe$, 称为 ϕ 相, $Al_{18}Cu_{10}Fe$, 称为 χ 相. 并认为这 4 种相的成分只是经验上的, 尚需进一步实验证实. 迄今, 除了 χ 相, 其余三种相包括它们的结构均已被探明, 有关 ϕ 相的存在还有争论^[2]. 1987 年, Tsai 等^[3]发现了稳定的 $Al_{65}Cu_{23}Fe_{12}$ 二十面体准晶相 (本文称其为 IQC). Calvayrac 等^[4]指出该准晶相即为 ψ 相. 为了获得单相多晶和大尺寸单晶体的 Al-Cu-Fe

* 国家自然科学基金资助项目 19974030

收到初稿日期: 2002-12-17, 收到修改稿日期: 2003-03-31

作者简介: 赵东山, 男, 1962 年生, 副教授, 博士生

准晶, 该成分附近区域的 Al-Cu-Fe 三元相图、凝固过程等的研究又成为热点^[2,5-9].

Gayle 等^[2]的 Al-Cu-Fe 三元相图的单变量线(液相面交线)投影图(图 1), 给出了准晶相液相面的成分范围, 表明在准晶成分范围之外即在贫 Fe 的接近三元相图 Al-Cu 底边的小范围(Al, Cu 和 Fe 的原子分数范围分别为 54%—64%, 35%—43%, 2%—4%)内的合金, 凝固时将析出初生的准晶相. 图 1 中, “ ψ ”指准晶相, “ λ ”和“ β ”分别指二元 Al-Fe 化合物相 λ -Al₁₃Fe₄ 和 CsCl 结构的 β -Al(Fe, Cu) 相; “ η ”和“ ε ”分别指二元 Al-Cu 化合物相 η -AlCu 和 ε -Al₂Cu₃ 相. 根据图 1, Gayle 等^[2]提出的相变反应为, P_1 (860 °C): $L + \lambda + \beta \rightarrow \text{IQC}$, U_4 (725 °C): $L + \lambda \rightarrow \text{IQC} + \omega$, U_5 (695 °C): $L + \text{IQC} \rightarrow \beta + \omega$, U_6 (? °C): $L + \varepsilon \rightarrow \beta + \eta$, U_7 (? °C): $L + \beta \rightarrow \omega + \eta$.

为了深入研究 Al-Cu-Fe 合金中初生准晶相的凝固过程, 根据 Gayle 等^[2]的报道(见图 1), 本工作选取成分位于准晶相液相面邻近区域的合金, 采用金相(OM)、粉末 X 射线衍射(XRD)及扫描电子显微(SEM)观察等技术, 利用背散射电子衍射(EBSD)分析方法, 并进行了透射电子显微(TEM)分析和高分辨电子显微(HRTEM)观察.

1 实验方法

本研究采用纯铝($\geq 99.85\%$)、纯铜($\geq 99.9\%$)、高纯铁($> 99.99\%$)及高纯硅($> 99.99\%$)原材料, 按表 1 中的合金成分(位置如图 1 所示), 采用真空感应炉在氩气保护下熔炼, 并按照表 1 中的凝固条件得到铸锭(No.2, No.3 合金中加入微量 Si 置换 Al-Cu-Fe 中部分 Fe, 将增加准晶相的稳定性^[10]). 金相试样采用机械抛光, 腐蚀

剂为 10%NaOH 溶液.

粉末 X 射线衍射采用 Philips PW1700 X 射线衍射仪, 辐射为 $\text{CuK}\alpha$, 工作电压为 40 kV, 工作电流为 40 mA, 扫描速度为 $2^\circ/\text{min}$, 扫描范围(2θ)为 14° — 100° . 制备粉末试样, 采用球磨仪或者陶瓷研钵, 颗粒为 50 — $74 \mu\text{m}$.

SEM 观察, EDXS 和 EBSD 分析采用 JEOL JSA-8800R 型电子探针以及 EBSD 附件. 利用配备 OXFORD ISIS EDXS 附件的 JEM-2000FX 电镜进行选区电子衍射(SAED)分析, 高分辨电镜(HRTEM)观察在 JEM-2010 上进行. TEM 试样采用机械减薄至约 $50 \mu\text{m}$, 而后采用化学双喷减薄(电解液是硝酸与甲醇溶液, 按 1 : 2 比例配制), 最终采用离子减薄.

2 实验结果

2.1 初生准晶相的形成

图 2 为水淬态 Al_{59.2}Cu₃₇Fe₃Si_{0.8} 合金(对应图 1 No.2 合金, 包括表 1 中的 No.1 和 No.3)以及 Al₅₇Cu₄₀Fe₃ 合金(No.9)的 SEM 背散射电子像. 图 2 中 1, 2, ... 为 EDXS 分析点. 成分分析结果表明, 图 2a, b 中标记 1 的区域, 平均成分分别为 Al_{61.9}Cu_{25.6}Fe_{12.5} 与 Al_{62.0}Cu_{27.5}Fe_{10.5} 与准晶相成分接近; 周围浅灰色区域(图 2a, b 中区域 2)是后析出 ϕ 相, 平均成分分别为 Al_{50.6}Cu_{45.4}Fe_{4.0} 与 Al_{51.7}Cu_{41.8}Fe_{6.5}, 呈现包晶反应特征; 黑色区域(图 2a, b 中区域 3)是 θ -Al₂Cu 相; 白色枝晶相(图 2a 中区域 4, 图 2b 中区域 4 和 5)是 η_2 -AlCu 相. 根据图 2 的凝固组织特征, 可见 θ -Al₂Cu 相和 η_2 -AlCu 相是在高温保温结束后由未凝固的剩余液体水淬而形成的.

图 2 中标记 1 区域的相的 EBSD 图样, 与按准晶相

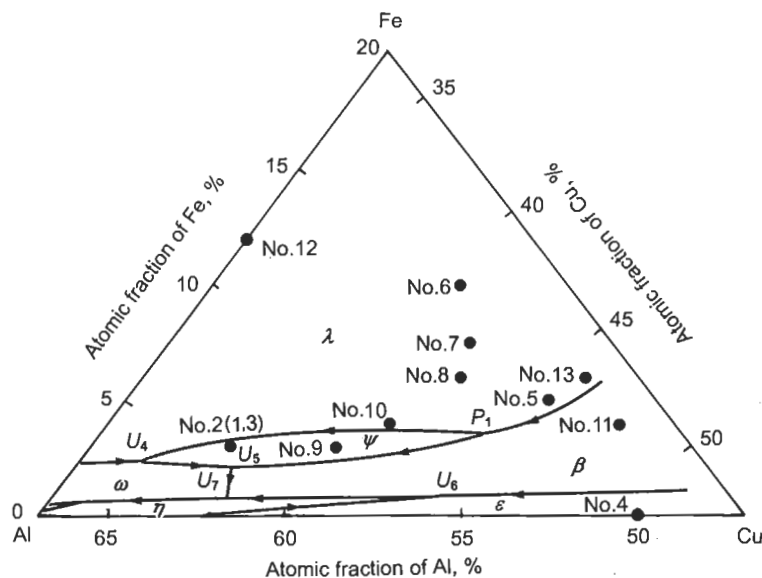


图 1 Gayle 等^[2]报道的 Al-Cu-Fe 三元相图的液相面交线投影图

Fig.1 Liquid surface projection for the Al-Cu-Fe system reported by Gayle et al^[2]

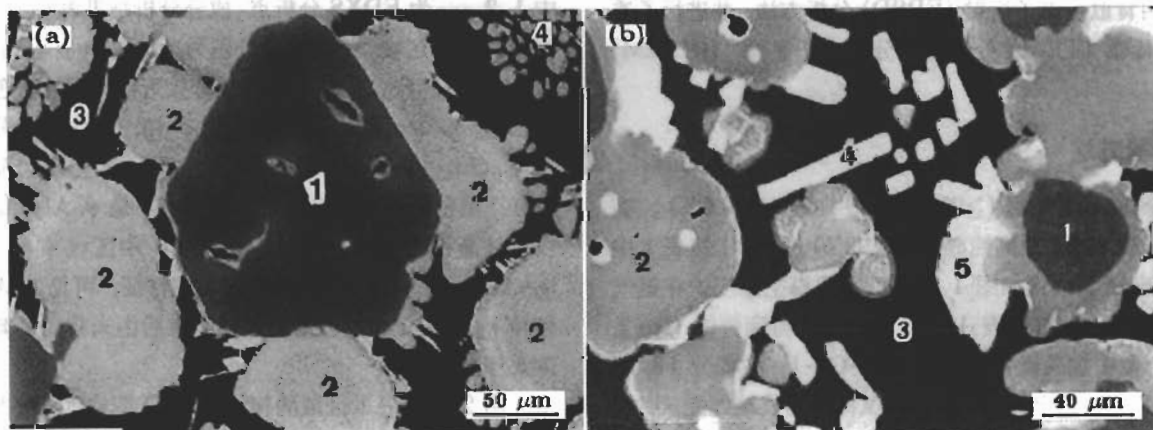
表 1 本实验中所配合金的成分、凝固条件及凝固组织

Table 1 Compositions, solidified conditions and microstructures of the prepared Al-Cu-Fe alloys

Alloy No.	Composition atomic fraction, %	Solidification condition	Microstructure
1	Al ₆₀ Cu ₃₇ Fe ₃	AC	IQC (primary)+ ϕ + θ + η_2
2	Al _{59.2} Cu ₃₇ Fe ₃ Si _{0.8}	700 °C, 2.5 h, WQ	IQC(primary)+ ϕ + θ + η_2) ¹⁾
3	Al _{59.2} Cu ₃₇ Fe ₃ Si _{0.8}	AC	IQC (primary)+ ϕ + θ + η_2
4	Al ₅₀ Cu ₅₀	700 °C, 2.5 h, WQ	ε_2) ²⁾ (primary)+(θ + η_2)
5	Al ₅₀ Cu ₄₅ Fe ₅	700 °C, 2.5 h, WQ	ϕ (primary)+ ε_2 + (θ + η_2)
6	Al ₅₀ Cu ₄₀ Fe ₁₀	700 °C, 2.5 h, WQ	β
7	Al ₅₁ Cu _{41.5} Fe _{7.5}	900 °C, 2 h, WQ	β (primary)+ ε_1) ²⁾
8	Al ₅₂ Cu ₄₂ Fe ₆	900 °C, 2 h, WQ	β (primary)+ ε_1 + (θ + η_2)
9	Al ₅₇ Cu ₄₀ Fe ₃	800 °C, 2 h, WQ	IQC (primary)+ β + ϕ + ε_2 + (θ + η_2)
10	Al ₅₅ Cu ₄₁ Fe ₄	900 °C, 2 h, WQ	β (primary)+ ϕ + (θ + η_2)
11	Al _{48.5} Cu _{47.5} Fe ₄	850 °C, 2 h, WQ	ϕ (primary)+ ε_1 or ε_2
12	Al ₅₅ Cu ₃₃ Fe ₁₂	850 °C, 2 h, WQ	β (primary)+IQC+ ε_1 or ε_2
13	Al _{48.5} Cu _{45.5} Fe ₆	900 °C, 2 h, WQ	ϕ + β + ε_1

1) (θ + η_2) solidified from the remaining melt

2) The ε phase (Al₂Cu₃) has high temperature variant ε_1 , and low temperature (<850 °C) variant ε_2

图 2 水淬 Al_{59.2}Cu₃₇Fe₃Si_{0.8} 与 Al₅₇Cu₄₀Fe₃ 的 SEM 背散射电子像Fig.2 SEM composition images of the WQ Al_{59.2}Cu₃₇Fe₃Si_{0.8} (a) and Al₅₇Cu₄₀Fe₃ alloy (b)

(a) area 1 corresponding to IQC, areas 2 the ϕ phase, areas 3, 4 corresponding to θ (Al₂Cu) phase and η_2 (AlCu) phase respectively (b) area 1 corresponding to IQC, area 2 the ϕ + β phases, area 3 the θ phase, areas 4 and 5 corresponding to η_2 phase

模型模拟计算的 EBSD 图样^[11]符合很好.

Al_{59.2}Cu₃₇Fe₃Si_{0.8} 和 Al₅₇Cu₄₀Fe₃ 合金的粉末 X 射线衍射谱^[11]表明,铸态样品中存在 4 种相分别为:准晶相, CsCl 结构的 β -Al(Fe, Cu) 相, θ -Al₂Cu 相和 η_2 -AlCu 相.

由于目前粉末 XRD 以及 EBSD 技术对于晶体超结构的弱反射的测定尚有困难,对合金 Al_{59.2}Cu₃₇Fe₃Si_{0.8} 的铸锭不同部位制取多个透射电镜试样,借助透射电镜的 EDXS 附件,验证了 SEM 及 XRD 对准晶相, θ -Al₂Cu 相和 η_2 -AlCu 相分析结果. 图 3 为图 2a 中标记 2 处

的相的选区电子衍射花样 (SAEDP), 表明它是有空位的 CsCl 结构 (完整的 CsCl 结构相为 β 相): γ 黄铜结构或 τ_3 相 (Ni₂Al₃ 结构) 的微畴. 借助 HRTEM, 得知其为 τ_3 相 (Ni₂Al₃ 结构) 的微畴结构^[11]. 根据 Bradly 等^[1], Faudot^[5] 及董闯^[8] 的报道, 稳定的 Al-Cu-Fe 三元化合物 ϕ 相具有 Ni₂Al₃ 结构, 经验成分为 Al₁₀Cu₁₀Fe. 可见, 图 2a 中标记 2 的各点是稳定的三元化合物 ϕ 相. 图 2b 中标记 2 的区域平均成分为 Al_{51.7}Cu_{41.8}Fe_{6.5}, 成分上比 Bradly 等^[1], Faudot^[5] 及董闯^[8] 报道的 ϕ 相成分 (Al_{47.6}Cu_{47.6}Fe_{4.8}Al)Al 和 Fe 的含量稍高, 因而

该区域可能为 ϕ 相与 β -Al(Fe, Cu) 相的混合.

2.2 初生晶 ϕ 相与 β 相

SEM 观察表明, 水淬 $\text{Al}_{50}\text{Cu}_{45}\text{Fe}_5$ 合金 (No.5), $\text{Al}_{48.5}\text{Cu}_{47.5}\text{Fe}_4$ 合金 (No.11) 以及 $\text{Al}_{48.5}\text{Cu}_{45.5}\text{Fe}_6$ 合金 (No.13) 具有相似的显微组织.

图 4a, b 分别为 $\text{Al}_{50}\text{Cu}_{45}\text{Fe}_5$ 和 $\text{Al}_{48.5}\text{Cu}_{47.5}\text{Fe}_4$ 合金表面的 SEM 背散射电子像, 其中 1, 2, ... 为 EDXS 分析点. 图 4a 中标记 1 的各区域 (呈浅灰色) 是先析出相, 平均成分为 $\text{Al}_{50.4}\text{Cu}_{44.4}\text{Fe}_{5.2}$; 在胞状初生晶内部的白色球状相 (标记 2 的点) 是后析出相, 平均成分为 $\text{Al}_{42.3}\text{Cu}_{56.9}\text{Fe}_{0.8}$, 即为 ϵ - Al_2Cu_3 相; 而标记 3, 4 的点分别是 η_2 -AlCu 相和 θ - Al_2Cu 相. 对 $\text{Al}_{50}\text{Cu}_{45}\text{Fe}_5$ 样品不同部位制取多个透射电镜试样, 通过选区电子衍射分析表明; 图 4a 中标记 1 的相的 SAEDP 呈现与图 3 相同的衍射图, 它仍具有空位的 CsCl 结构, 即 ϕ 相. 对于图 4b, EDXS 分析表明, 标记 1 的各区域 (呈灰色) 是 ϕ 相, 平均成分为 $\text{Al}_{47.9}\text{Cu}_{47.1}\text{Fe}_{5.0}$, 与 Bradly 等^[1], Faudot^[5] 和董闯^[6] 报道的 ϕ 相成分 ($\text{Al}_{47.6}\text{Cu}_{47.6}\text{Fe}_{4.8}$) 符合很好. 图 4b 中标记 2 的各区域 (呈白色), 经 EDXS 分析确认为 ϵ - Al_2Cu_3 相. 而 $\text{Al}_{48.5}\text{Cu}_{45.5}\text{Fe}_6$ 合金的显微组织中呈灰色的各区域, EDXS 测定的平均成分为 $\text{Al}_{48.3}\text{Cu}_{44.2}\text{Fe}_{7.5}$, 具有较高的 Fe 含量, 是 ϕ 相与 β -Al(Fe, Cu) 相的混合.

图 5a, b 分别为 $\text{Al}_{55}\text{Cu}_{41}\text{Fe}_4$ 合金 (No.10) 和 $\text{Al}_{52}\text{Cu}_{42}\text{Fe}_6$ 合金 (No.8) 表面的 SEM 背散射电子像, 其中 1, 2, ... 亦为 EDXS 分析点. 成分分析结果表明, 图 5a 中标记 1 的区域 (呈浅灰色, 先凝固的相) 为 $\text{Al}_{51.9}\text{Cu}_{37.4}\text{Fe}_{10.7}$ (也测到成分为 $\text{Al}_{53.2}\text{Cu}_{40.7}\text{Fe}_{6.1}$ 的点), 图 5b 中标记 1 的区域平均成分为 $\text{Al}_{49.4}\text{Cu}_{39.1}\text{Fe}_{11.5}$ (成分起伏小于 0.2%). SEM 观察到 $\text{Al}_{55}\text{Cu}_{33}\text{Fe}_{12}$ 合金 (No.12) 中先凝固的相的成分为 $\text{Al}_{51.4}\text{Cu}_{38.0}\text{Fe}_{10.4}$, $\text{Al}_{51}\text{Cu}_{41.5}\text{Fe}_{7.5}$ 合金 (No.7) 中先凝固的相的成分为 $\text{Al}_{49.8}\text{Cu}_{41.3}\text{Fe}_{8.9}$, 而 $\text{Al}_{50}\text{Cu}_{40}\text{Fe}_{10}$ 合金 (No.6) 的 SEM 背散射电子像几乎呈现单一相 (均匀的单颜色). $\text{Al}_{50}\text{Cu}_{40}\text{Fe}_{10}$ 合金 (No.6 合金) 的粉末 X 射线衍射谱, 也显示其为单一相, 如图 6. 按照 CsCl 结构并取点阵常数 $a=0.293$ nm, 可以将图 6 的全部衍射峰指标化, 因而, 该单一相为完整的 CsCl 结构. 进一步对合金 $\text{Al}_{50}\text{Cu}_{40}\text{Fe}_{10}$ 制取多个透射电镜试样, 进行选区电子衍射分析, 图 7 为沿 CsCl 坐标系 [101] 带轴的 SAEDP 图, 与图 3 对比显示没有超反射, 表明它是完整的 CsCl 结构, 即 β -Al (Fe, Cu) 相. 与 Gui 等^[7] 报道的有关 β -Al (Fe, Cu) 相的成分范围 $\text{Al}_{50}\text{Cu}_{50-x}\text{Fe}_x$ ($x \geq 8.0$) 对比, 可见图 5a 中标记 1 的区域含有 β 相, 图 5b 中标记 1 的区域是 β 相, 而 $\text{Al}_{55}\text{Cu}_{33}\text{Fe}_{12}$ 合金与 $\text{Al}_{51}\text{Cu}_{41.5}\text{Fe}_{7.5}$ 合金中先凝固的相都是 β 相.

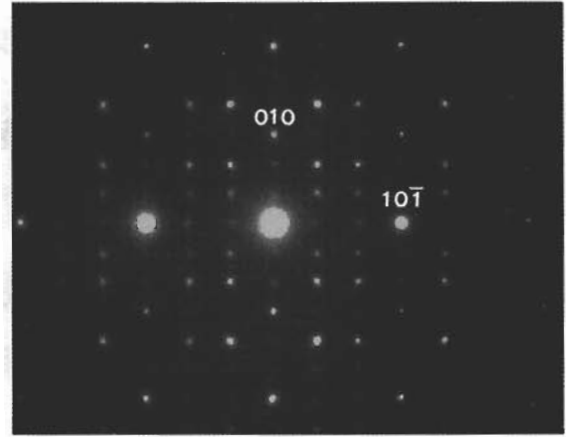


图 3 图 2a 中标记为 2 的相的选区电子衍射花样 (沿 CsCl 坐标系的 [101] 方向)

Fig.3 SAEDP taken from area 2 in Fig.2a (along the CsCl system [101] direction)

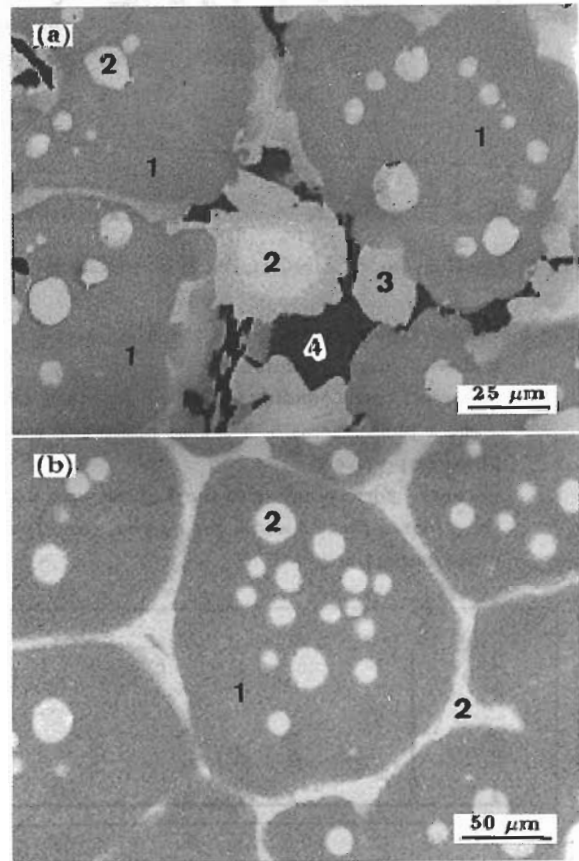


图 4 $\text{Al}_{50}\text{Cu}_{45}\text{Fe}_5$ 与 $\text{Al}_{48.5}\text{Cu}_{47.5}\text{Fe}_4$ 合金的 SEM 背散射电子像

Fig.4 SEM composition images of the $\text{Al}_{50}\text{Cu}_{45}\text{Fe}_5$ (a) and $\text{Al}_{48.5}\text{Cu}_{47.5}\text{Fe}_4$ alloys (b)
(a) area 1 corresponding to the ϕ phase, areas 2 the ϵ phase, areas 3 and 4 the η_2 phase and the θ phase respectively
(b) area 1 corresponding to the ϕ phase, areas 2 the ϵ phase

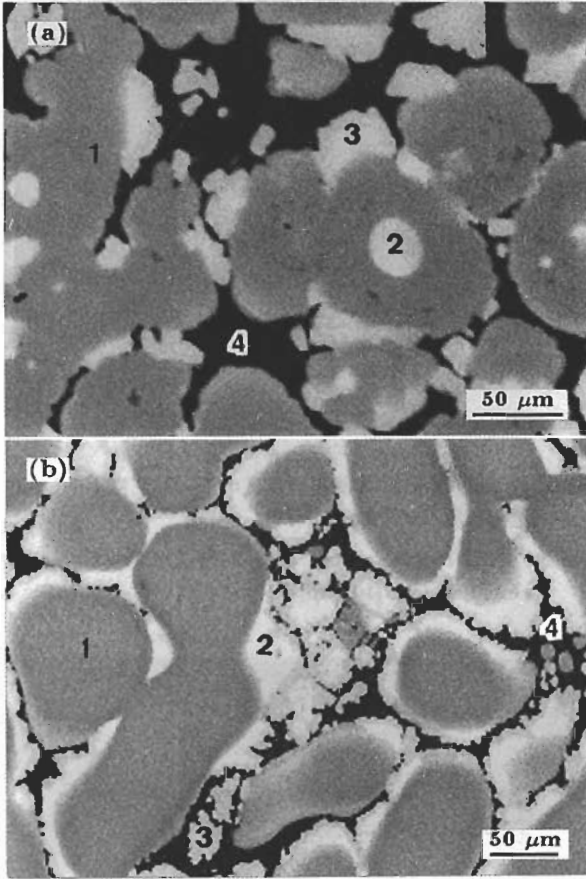


图5 Al₅₅Cu₄₁Fe₄ 与 Al₅₂Cu₄₂Fe₆ 样品的 SEM 背散射电子像

Fig.5 SEM composition images of the Al₅₅Cu₄₁Fe₄ (a) and Al₅₂Cu₄₂Fe₆ samples (b)
 (a) area 1 corresponding to the $\phi + \beta$ phases, area 2 the ϵ phase, areas 3, 4 the η_2 phase and the θ phase respectively
 (b) area 1 corresponding to the β phase, area 2 are the ϵ phase, areas 3 and 4 the η_2 phase and the θ phase respectively

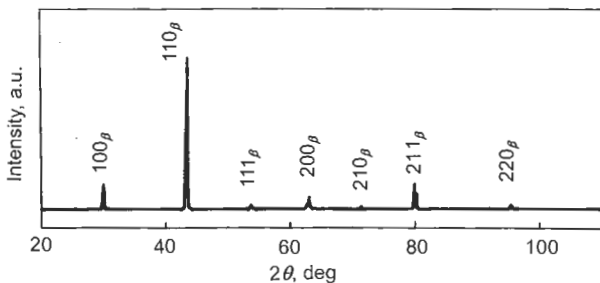


图6 Al₅₀Cu₄₀Fe₁₀ 合金的粉末 X 射线衍射谱

Fig.6 Powder XRD pattern of the Al₅₀Cu₄₀Fe₁₀ alloy, showing a single β -phase Al(Fe, Cu)

综合以上分析, 实验中各合金的相组成见表 1.

3 分析与讨论

本工作验证了 Gayle 等^[2] 有关初生准晶相的结论: No.2, No.9 合金首先形核析出准晶相. 尺寸约在百微米量级, 见图 2a. Al_{59.2}Cu₃₇Fe₃Si_{0.8} 合金中准晶相的凝

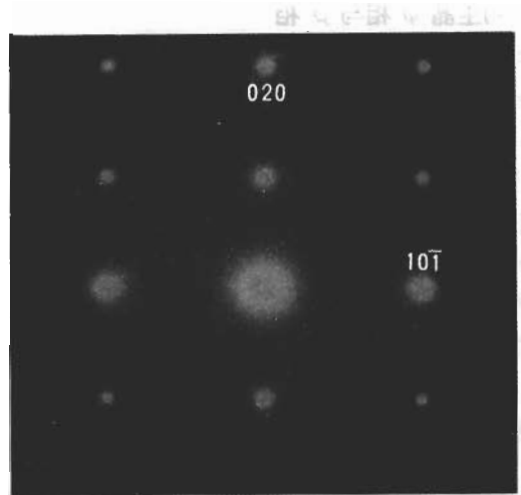


图7 Al₅₀Cu₄₀Fe₁₀ 选区电子衍射花样 SAEDP(沿 CsCl 坐标系的 [101] 方向)

Fig.7 SAEDP of Al₅₀Cu₄₀Fe₁₀ alloy (along the CsCl system [101] direction)

固过程可描述为: (1) 准晶相首先形核析出, 为初生相; (2) 在准晶相长大到一定时, 发生包晶反应 ($L + IQC \rightarrow \phi$) 形成 ϕ 相; (3) 剩余液体水淬形成 θ -Al₂Cu 相和 η_2 -AlCu 相.

根据 Gayle 等^[2] 报道的 Al-Cu-Fe 三元相图的单变量线 (液相面交线) 投影图 (图 1) 中 Nos.12, 10, 7, 8, 5, 6, 13 合金首先形核析出 λ -Al₁₃Fe₄ 相, No.11 合金的初生相为 β -Al(Fe, Cu) 相. 本工作的观测结果是: 图 1 中的 Nos.12, 10, 7, 8, 6 合金首先形核析出 β -Al(Fe, Cu) 相; Nos.11, 5 合金首先形核析出 ϕ 相, 见表 1; No.13 合金中 ϕ 相与 β 相的混合首先形核析出, 因 ϕ 相与 β 相的差别只在 Cu 与 Fe 的相对比例不同, SEM 的背散射电子像无法区分它们, 所以是否共晶析出, 尚待进一步的实验验证, 可见 No.13 合金的成分近似位于 ϕ 相与 β 相液相面交线处. 表 1 表明, No.9 合金在 800 °C 下 2 h 保温后由 4 种相组成: IQC, ϕ , β 和剩余液体 (L). 因而 No.9 合金的成分近似位于准晶相, ϕ 相与 β 相的液相面交点, 该点即为本实验中新观察到的一个 4 相反应点. 这样, 图 1 中的 β 液相面应当划分为 $\beta + \phi$ 两个区域, 即应当显现出 ϕ 相液相面区域. 而根据以上实验, 图 1 中的 β 和 λ 液相面交线也应当左移, 这与 Zhang 等^[12] 的报道一致. 因此, 结合本工作以上实验, 可将 Gayle 等^[2] 报道的 Al-Cu-Fe 三元相图的单变量线 (液相面交线) 投影图 (图 1) 进行部分修正, 如图 8 所示. 根据图 8, 修正后的 Al-Cu-Fe 三元相图的单变量线 (液相面交线) 的交点标示的相变反应为, 包晶反应 P_1 (884 °C): $L + \lambda + \beta \rightarrow IQC$, 包共晶反应 U_4 (737.5 °C): $L + \lambda \rightarrow IQC + \omega$, 包共晶反应 U_5 (695 °C): $L + IQC \rightarrow \phi + \omega$, 包共晶反应 U_6 (? °C): $L + \epsilon \rightarrow \phi +$

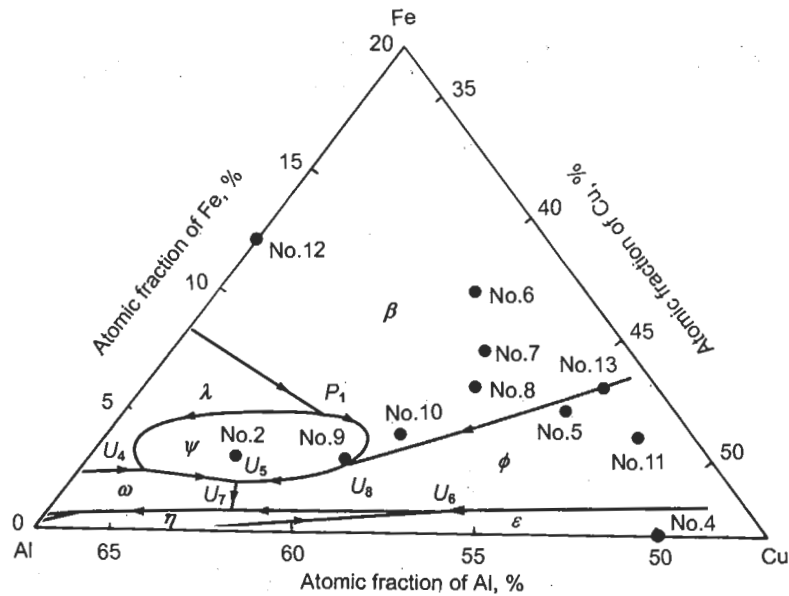


图 8 根据本实验与 Zhang 等^[12]的报道修正的 Al-Cu-Fe 三元相图的液相面交线投影图

Fig.8 The revised liquid surface projection for the Al-Cu-Fe system according to the present experiment and Zhang et al's report^[12]

η , 包共晶反应 U_7 (595 °C): $L+\phi \rightarrow +\omega\eta$, 新增加的包共晶反应 U_8 (约为 800 °C): $L+\beta \rightarrow \text{IQC}+\phi$. 而 IQC 和 ϕ 液相面交线 (图 8 中, U_8 到 U_5 之间连线) 的反应是包晶反应 ($L+\text{IQC} \rightarrow \phi$), 如 No.2 合金的凝固组织所呈现的反应.

4 结论

(1) Gayle 等^[2]报道的 Al-Cu-Fe 三元相图单变量线 (液相面交线) 投影图中的 β 液相面应当划分为 $\beta+\phi$ 两个区域, β 和 λ 液相面交线也应当左移.

(2) 新增的三元相变反应为包共晶反应 U_8 : $L+\beta \rightarrow \text{IQC}+\phi$, 反应温度约为 800 °C; 而修正的三元相变反应为包共晶反应 U_5 : $L+\text{IQC} \rightarrow \phi+\omega$ 及包共晶反应 U_6 : $L+\varepsilon \rightarrow \phi+\eta$ 和包共晶反应 U_7 : $L+\phi \rightarrow \omega+\eta$.

(3) Ni_2Al_3 结构的 ϕ 相的成分范围是 $\text{Al}_{47.3-50.6}\text{Cu}_{45.4-48.1}\text{Fe}_{4.5-5.2}$, 而其成分中心是 $\text{Al}_{47.9}\text{Cu}_{47.1}\text{Fe}_{5.0}$.

参考文献

[1] Bradley A J, Goldschmidt H J. *J Inst Met*, 1939; 65: 403
 [2] Gayle F W, Shapiro A J, Biancianiello F S, Boettinger W

J. *Metall Trans*, 1992; 23A: 2409
 [3] Tsai A P, Inoue A, Masumoto A. *J Mater Sci Lett*, 1987; 6: 1403
 [4] Calvayrac Y, Quivy A, Bessiere M, Lefebvre S, Quiquandon M C, Gratias D. *J Phys I France*, 1990; 51: 417
 [5] Faudot F. *Ann Chim Fr*, 1993; 18: 445
 [6] Grushko B, Wittenberg R, Holland-Moritz D. *J Mater Res*, 1996; 11: 2177
 [7] Gui J, Wang J, Wang R, Wang D, Liu J, Chen F. *J Mater Res*, 2001; 16: 1037
 [8] Dong C. *Quasicrystal Materials*. Beijing: China National Defence Industry Press, 1998: 47
 (董 闯. 准晶材料. 北京: 国防工业出版社, 1998: 47)
 [9] Zhang R K, Wang J B, Wang D H, Liu J, Chen F Y, Chen X M, Gui J N, Wang R H. *Acta Metall Sin*, 1999; 35: 463
 (张瑞康, 王建波, 汪大海, 刘 静, 陈方玉, 陈小梅, 桂嘉年, 王仁卉. 金属学报, 1999; 35: 463)
 [10] Lee S M, Jeon H J, Kim B H, Kim W T, Kin D H. *Mater Sci Eng*, 2001; (304-306)A: 871
 [11] Zhao D S, Wang R H, Gui J N, Shen N F, Qu W B, Guo X Y, Wu Z S, Zhang Z J, Sun L H. *J Chin Electron Microscopy Soc*, 2002; 21: 455
 (赵东山, 王仁卉, 桂嘉年, 沈宁福, 瞿文榜, 郭新勇, 吴志申, 张治军, 孙丽虹. 电子显微学报, 2002; 21: 455)
 [12] Zhang L M, Luck R. *J Alloys Compd*, 2001; 342: 53