

Ti-Zr-Ni 系三元准晶的成分特征研究 *

羌建兵¹⁾ 黄火根¹⁾ 王英敏^{1,2)} 姜楠¹⁾ 董闯^{1,3)}

1) 大连理工大学材料工程系, 大连 116024

2) 香港城市大学物理与材料科学系, 香港

3) 大连理工大学三束表面改性国家重点实验室, 大连 116024

摘要 系统研究了两个等电子浓度线 ($e/a=1.20, 1.25$) 上 Ti-Zr-Ni 铸态合金的组织与结构, 发现吸铸法可在很宽的成分区间 ($(\text{Ti}_x\text{Zr}_{100-x})_{100-y}\text{Ni}_y$, $43.75\% \leq x \leq 81.25\%$, $17\% \leq y \leq 20\%$) 内获得 Ti-Zr-Ni 准晶, 其中, $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{40}\text{Ni}_{20}$ 为理想准晶成分, 能形成长 15 mm、直径 6 mm 的单相准晶棒. 准晶成分特征研究表明: Ti-Zr-Ni 准晶系也具有与 Al 基三元准晶系相似的相图特征. 一方面, Ti-Zr-Ni 准晶与其类似相一起构成准晶“等电子浓度线”现象; 同时, 三元准晶成分满足准晶“变电子浓度线”特征, 形成准晶的理想成分 $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{40}\text{Ni}_{20}$ 位于准晶等电子浓度线与变电子浓度线交点处.

关键词 准晶, Ti-Zr-Ni 合金, 电子浓度

中图分类号 TG115.22

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2004)07-0677-06

COMPOSITIONAL CHARACTERISTIC OF TERNARY QUASICRYSTALS IN Ti-Zr-Ni SYSTEM

QIANG Jianbing¹⁾, HUANG Huogen¹⁾, WANG Yingmin^{1,2)}, JIANG Nan¹⁾, DONG Chuang^{1,3)}

1) Department of Materials Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024

2) Department of Physics and Materials Science, City University of Hongkong, Hongkong

3) State Key Laboratory for Materials Modification by Laser, Ion and Electron Beams, Dalian University of Technology, Dalian 116024

Correspondent: QIANG Jianbing, Tel: (0411)4708615, E-mail: qiang@dlut.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.59971014)

Manuscript received 2003-07-28, in revised form 2003-11-03

ABSTRACT Ti-Zr-Ni alloy rods along two e/a -constant lines ($e/a=1.20, 1.25$) were prepared by using suction-casting method, the systematic investigation on these as-cast alloys shows that Ti-Zr-Ni quasicrystals are formed over a large range of composition, ($(\text{Ti}_x\text{Zr}_{100-x})_{100-y}\text{Ni}_y$ ($43.75\% \leq x \leq 81.25\%$, $17\% \leq y \leq 20\%$). Among them, $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{40}\text{Ni}_{20}$ is the ideal quasicrystals-forming composition, where a nearly pure bulk quasicrystal rod, 6 mm in diameter and 15 mm in length, can be obtained. The Ti-Zr-Ni system are found to have the similar characteristic to the Al-base ternary quasicrystalline phase diagram features, indicating that the ideal quasicrystals-forming composition should be located at the crossing point of the two specific lines, termed as e/a -constant and e/a -variant lines. This kind of phase diagram features can be used as an empirical criterion forming ternary quasicrystals.

KEY WORDS quasicrystal, Ti-Zr-Ni alloy, electron concentration

Al 基三元准晶系相图特征研究表明^[1-4], 三元准晶在相图上的分布满足一定规律. 一方面, 三元准晶与其晶体类似相一起位于同一等电子浓度线附近, 其成分相区也沿该等电子浓度线方向伸展, 构成准晶“等电子浓度线”现象^[1-2]. 同时, 三元准晶与二元准晶存在密切联系, 它们同第三组元一起落在同一变电子浓度线上, 形成准晶

“变电子浓度线”特征^[3-4], 三元准晶的理想成分位于准晶等电子浓度线和准晶变电子浓度线的交点附近, 这就是基于相图的三元准晶成分判据, 它可用以优化准晶成分和发展新的准晶合金^[4-5].

Ti-Zr-Ni 准晶是过渡金属基准晶, 其结构有序度高, 并具备优良的储氢性能, 可以用作储氢和燃料电池材料^[6,7], 有很高的研究价值. Ti-Zr-Ni 准晶最先由 Sibirtsev 等^[8] 及 Molokanov 等人^[9] 用急冷甩带法得到, 其典型成分为 $\text{Ti}_{53}\text{Zr}_{27}\text{Ni}_{20}$. Kelton 等人^[6] 的研究证实成分为 $\text{Ti}_{53}\text{Zr}_{27}\text{Ni}_{20}$ 和 $\text{Ti}_{45}\text{Zr}_{38}\text{Ni}_{17}$ 的准晶薄带有一定的热力学稳定性, 他们在特定工艺下对原

* 国家自然科学基金资助项目 59971014

收到初稿日期: 2003-07-28, 收到修改稿日期: 2003-11-03

作者简介: 羌建兵, 男, 1973 年生, 讲师, 博士

始组织为 α -Ti(Zr) 和 C14 混合物的 $Ti_{45}Zr_{38}Ni_{17}$ 和 $Ti_{41.5}Zr_{41.5}Ni_{17}$ 铸态合金进行高真空退火 64 h, 经固态相变获得了准晶相. 但块状 Ti-Zr-Ni 准晶样品的制备仍十分困难^[10,11], 且 Ti-Zr-Ni 系准晶的成分区域并未确定. 本文根据 Ti-Zr-Ni 准晶系的相图特征, 设计出系列 Ti-Zr-Ni 合金成分. 用常规真空熔炼吸铸方法成功制备出块状 Ti-Zr-Ni 准晶合金, 系统研究了块状铸态 Ti-Zr-Ni 合金样品的组织与结构, 确定出吸铸法形成 Ti-Zr-Ni 准晶合金的成分区域, 并从相图特征出发, 分析和讨论了 Ti-Zr-Ni 准晶的成分特征.

1 实验方法

沿 17%Ni ($e/a=1.25$) 和 20%Ni ($e/a=1.20$) (原子分数, 下同) 两等电子浓度线选取成分 (见表 1, 其中 Ti, Zr, Ni 的价电子贡献按 +1.5, +1.5 和 0 计^[5]), 用高纯原料 Ti, Zr, Ni (纯度 >99%) 配制合金, 在非自耗真空电弧炉中反复熔炼多次, 得到成分均匀的合金铸锭. 随后, 用自制吸铸设备制备直径为 6 mm 的圆柱状样品. 整个样品熔铸过程有纯 Ar 气氛保护, 合金样品总烧损率低于 0.1% (质量分数).

用 Shimadzu XRD-6000 X 射线衍射仪 (CuK_{α} 辐射) 测定合金样品的相组成, 在带有能谱附件的 JEOL-5600LV 型扫描电镜上对铸态合金腐蚀样品作形貌观察

和成分分析, 金相腐蚀试剂为氢氟酸硝酸水溶液, 体积配比为 $HF:HNO_3:H_2O=1:2:4$. 用标准双喷法在 $HClO_4-C_2H_5OH$ 溶液中 (体积比为 1:8) 制备透射电镜薄膜样品, 在 JEOL-100CXII 型透射电镜上对其进行分析.

2 实验结果与分析

2.1 17%Ni 等电子浓度线 ($e/a=1.25$) 上合金相结构

X 射线衍射分析结果表明, 17%Ni 系列成分中, 位于等电子浓度线两端的合金, 如 1—5 号、16 和 17 号等样品, 形成了 Zr_2Ni 或 Ti_2Ni 与 Ti(Zr) 固溶体的伪共晶组织, 几乎无准晶相的形成; 而位于该等电子浓度线中间区域的合金, 都具有良好的准晶形成能力. 图 1 是部分合金的 X 射线衍射谱, 其中, 大部分衍射峰可用二十面体准晶的 Cahn 指数法^[12] 标定, 表明这些合金中主要相是二十面体准晶相 (合金中准晶相的体积分数都高于 85%, 称之为准晶合金, 下同), 而合金中的少量相是 C14 Laves 相和 Ti(Zr) 固溶体. 由图 1 可知, 17%Ni 等电子浓度线上所有准晶合金中都有 Ti(Zr) 固溶体生成, 这意味着 17%Ni 等电子浓度线 ($e/a=1.25$) 穿越了准晶与 Ti(Zr) 固溶体相构成的两相区, 即线上准晶合金的化学组成相对于准晶相区是富 Ti(Zr) 的. 表 1 中列出了 17%Ni 系列合金的相分析结果.

表 1 Ti-Zr-Ni 合金的名义成分及其相组成

Table 1 Chemical and phase compositions of the Ti-Zr-Ni alloys (minority phases are marked by underlines)

Ti ₈₃ Ni ₁₇ -Zr ₈₃ Ni ₁₇ with $e/a=1.25$ line			Ti ₈₀ Ni ₂₀ -Zr ₈₀ Ni ₂₀ with $e/a=1.20$ line		
Sample No.	Composition atomic fraction, %	Phase constitution	Sample No.	Composition atomic fraction, %	Phase constitution
1	Zr ₈₃ Ni ₁₇	$\alpha+Zr_2Ni$	1'	Zr ₈₀ Ni ₂₀	$Zr_2Ni+\alpha$
2	Ti ₅ Zr ₇₈ Ni ₁₇	$Zr_2Ni+\alpha$	2'	Ti ₅ Zr ₇₅ Ni ₂₀	$Zr_2Ni+\alpha$
3	Ti ₁₀ Zr ₇₃ Ni ₁₇	$Zr_2Ni+\alpha$	3'	Ti ₁₀ Zr ₇₀ Ni ₂₀	$Zr_2Ni+\alpha+\beta$
4	Ti ₁₅ Zr ₆₈ Ni ₁₇	$Zr_2Ni+\alpha+\beta$	4'	Ti ₁₅ Zr ₆₅ Ni ₂₀	$Zr_2Ni+\beta+\alpha+I$
5	Ti ₂₀ Zr ₆₃ Ni ₁₇	$Zr_2Ni+\alpha+\beta$	5'	Ti ₂₀ Zr ₆₀ Ni ₂₀	$Zr_2Ni+I+\alpha+\beta$
6	Ti ₂₅ Zr ₅₈ Ni ₁₇	$Zr_2Ni+I+\alpha+\beta$	6'	Ti ₂₅ Zr ₅₅ Ni ₂₀	$I+I'+Zr_2Ni+\alpha+\beta$
7	Ti ₃₀ Zr ₅₃ Ni ₁₇	$I+Zr_2Ni+\alpha+\beta$	7'	Ti ₃₀ Zr ₅₀ Ni ₂₀	$I+Zr_2Ni+\alpha+\beta+C14$
8	Ti ₃₅ Zr ₄₈ Ni ₁₇	$I+\alpha+\beta$	8'	Ti ₃₅ Zr ₄₅ Ni ₂₀	$I+\alpha$
9	Ti ₄₀ Zr ₄₃ Ni ₁₇	$I+\alpha$	9'	Ti ₄₀ Zr ₄₀ Ni ₂₀	I
10	Ti ₄₅ Zr ₃₈ Ni ₁₇	$I+\alpha+C14$	10'	Ti ₄₅ Zr ₃₅ Ni ₂₀	$I+\alpha$
11	Ti ₅₀ Zr ₃₃ Ni ₁₇	$I+\alpha+C14$	11'	Ti ₅₀ Zr ₃₀ Ni ₂₀	$I+\alpha$
12	Ti ₅₅ Zr ₂₈ Ni ₁₇	$I+\alpha$	12'	Ti ₅₅ Zr ₂₅ Ni ₂₀	$I+\alpha$
13	Ti ₆₀ Zr ₂₃ Ni ₁₇	$I+\alpha$	13'	Ti ₆₀ Zr ₂₀ Ni ₂₀	$I+\alpha$
14	Ti ₆₅ Zr ₁₈ Ni ₁₇	$I+\alpha+C14$	14'	Ti ₆₅ Zr ₁₅ Ni ₂₀	$I+\alpha+C14$
15	Ti ₇₀ Zr ₁₃ Ni ₁₇	$I+\alpha+C14$	15'	Ti ₇₀ Zr ₁₀ Ni ₂₀	$Ti_2Ni+\alpha+I$
16	Ti ₇₅ Zr ₈ Ni ₁₇	$\alpha+Ti_2Ni$	16'	Ti ₇₅ Zr ₅ Ni ₂₀	$\alpha+Ti_2Ni$
17	Ti ₈₃ Ni ₁₇	$\alpha+Ti_2Ni$	17'	Ti ₈₀ Ni ₂₀	$\alpha+Ti_2Ni$

Note: I and I'—Icosahedron quasicrystals with different quasilattice constants

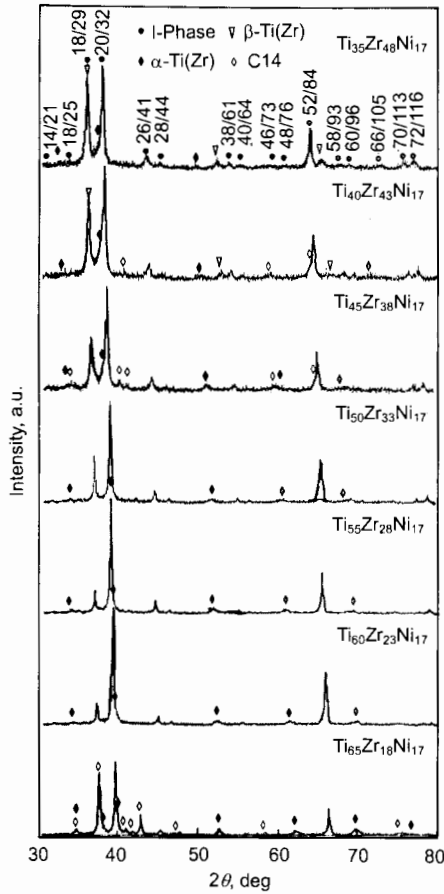


图 1 17%Ni 系列 ($e/a=1.25$) 铸态准晶合金的 X 射线衍射谱
 Fig.1 XRD patterns of the as-cast Ti-Zr-Ni(17%Ni) quasicrystalline alloys ($e/a=1.25$)

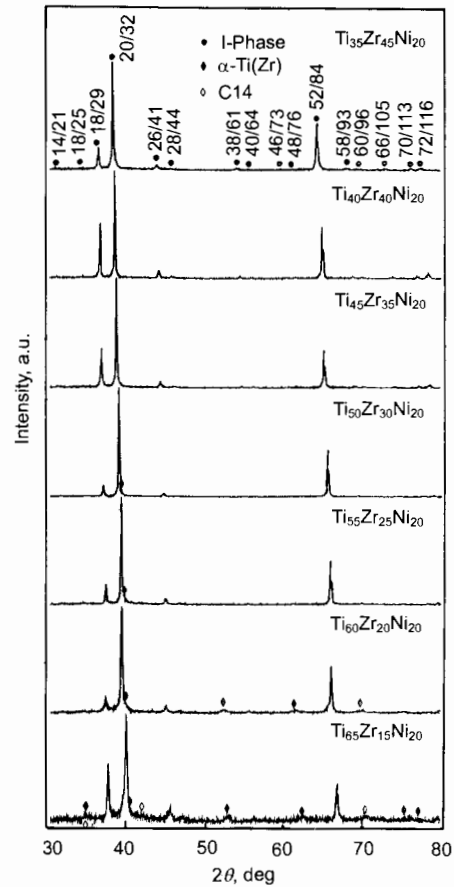


图 2 20%Ni 系列 ($e/a=1.20$) 铸态准晶合金的 X 射线衍射谱
 Fig.2 XRD patterns of the as-cast Ti-Zr-Ni(20%Ni) quasicrystalline alloys ($e/a=1.20$)

2.2 20%Ni 等电子浓度线 ($e/a=1.20$) 上合金 相结构

与 $e/a=1.25$ 等电子浓度线相似，在 20%Ni 等电子浓度线系列合金上的 $Zr_{80}Ni_{20}$ 成分处，生成了由 $Zr_2Ni(Al_2Cu)$ 型与 $\alpha-Ti(Zr)$ 固溶体构成的共晶组织，随着合金的 Ti 组元含量递增， Al_2Cu 型 $(Zr/Ti)_2Ni$ 相和 $\alpha-Ti(Zr)$ 固溶体的点阵参数逐渐变小。在 $Ti_{15}Zr_{65}Ni_{20}$ 成分点附近，合金中开始出现二十面体准晶相。至 $Ti_{30}Zr_{50}Ni_{20}$ 处，准晶已成为合金的主要组成相。在 $Ti_{35}Zr_{45}Ni_{20}$ — $Ti_{65}Zr_{15}Ni_{20}$ 的成分区间内，都可形成高质量的铸态块状准晶合金。其中， $Ti_{40}Zr_{40}Ni_{20}$ 是最佳成分，在该处形成了几乎完全单相的准晶合金。偏离这一理想成分，常有少量的 Ti(Zr) 固溶体和 C14 相与准晶相共生。图 2 是 20%Ni 准晶合金的 X 射线衍射谱。当合金中 Ti 含量增大到 70% 时，合金中将有面心立方 $(Ti, Zr)_2Ni$ 相大量生成，此时准晶相含量已急剧下降。在 $Ti_{80}Ni_{20}$ 附近，形成了由 $(Ti, Zr)_2Ni$ 相与 Ti(Zr) 固溶体构成的共晶组织，准晶相完全消失。20%Ni 系列合金相组成的全部信息也列于表 1 中。

X 射线衍射结果显示：吸铸法能在较宽的成分区间内获得 Ti-Zr-Ni 准晶相，由于这些准晶相的化学组成不尽相同，其准点阵常数数值也不一样。根据能谱测试结果，20%Ni 线上 8'—14' 号样品中准晶相的化学组成基本与合金的名义成分相同，结合准晶相的衍射数据，可得到准晶相三强峰 (18/29, 20/32 和 52/84 峰) 对应的晶面间距 d 值随相成分的变化趋势 (图 3)。一般的，Ti-Zr-Ni 准晶的准点阵常数 a_R 会随着合金中大原子 Zr 含量的增加而增大，其值介于 0.505—0.526 nm 之间。

20%Ni 准晶合金共有两种特征组织。一种是 $Ti_{40}Zr_{40}Ni_{20}$ 合金的单相准晶合金形貌，其二次电子像没有明显衬度；另一种为偏离 $Ti_{40}Zr_{40}Ni_{20}$ 理想成分点的准晶合金，其中形成的是准晶加少量晶体相的混合组织。透射电镜研究结果与此一致。图 4 是 $Ti_{40}Zr_{40}Ni_{20}$ 单相准晶的明场像和选区电子衍射花样。电子衍射结果表明该相为简单型二十面体准晶，其中无明显畸变发生。在明场像中，Ti-Zr-Ni 准晶出现斑点状衬度，倾转样品时衬度无明显变化，这种衬度的形成机制须进一步研究。在偏离理想成分 $Ti_{40}Zr_{40}Ni_{20}$ 的准晶合金中，常有 Ti(Zr)

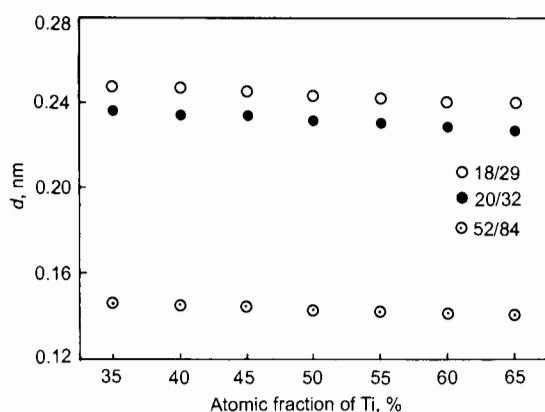


图3 $Ti_xZr_{80-x}Ni_{20}$ 系列准晶的三强峰 (18/29, 20/32 和 52/84) 对应的晶面间距值

Fig.3 The spacing values (d) measured by XRD for the three strongest peaks (18/29, 20/32 and 52/84 peak) of $Ti_xZr_{80-x}Ni_{20}$ quasicrystals

固溶体和 C14 相与准晶共生. 富 Ti 准晶合金中的 Ti(Zr) 固溶体主要以 α -Ti(Zr) 六角相形式存在, 而在富 Zr 的准晶合金中, Ti(Zr) 固溶体多以体心立方 β -Ti(Zr) 相形式存在. 与 C14 相类似, β -Ti(Zr) 相与准晶相间常

有晶体学取向关系, 没有发现六角 α -Ti(Zr) 相与准晶间的结构联系. 图 5 是 $Ti_{60}Zr_{20}Ni_{20}$ 准晶合金的明场像和电子衍射花样, 该合金中有少量的 α -Ti(Zr) 和 C14 相与准晶共存, 其中, C14 相与准晶相间的取向关系为: $\langle 010 \rangle_{C14} \parallel \langle 5\text{-fold} \rangle_i$, $\{004\}_{C14} \parallel \{20/32\}_i$. 图 6 为 $Ti_{30}Zr_{50}Ni_{20}$ 合金两相组织 (β -Ti(Zr)+I) 的明场像和电子衍射谱, β -Ti(Zr) 相与准晶相间的取向关系为: $\langle 001 \rangle_\beta \parallel \langle \text{pseudo-2-fold} \rangle_i$, $\{110\}_\beta \parallel \{18/29\}_i$.

2.3 Ti-Zr-Ni 准晶相成分特征

17%Ni 和 20%Ni 等电子浓度线研究表明: 吸铸法可在很宽的成分范围内获得 Ti-Zr-Ni 准晶相, 准晶合金的形成区间为 $(Ti_xZr_{100-x})_{100-y}Ni_y$ ($43.75\% \leq x \leq 81.25\%$, $y=17\%$, 20%), 其中, $Ti_{40}Zr_{40}Ni_{20}$ 处可形成单相准晶合金, 是形成 Ti-Zr-Ni 准晶的最佳成分点. 图 7 是 Ti-Zr-Ni 合金系的成分图, 图中标出了各合金相的位置, 包括 Ti-Zr-Ni 准晶的成分区及 20%Ni 等电子浓度线 ($e/a=1.20$). 由图可见, 1/1 准晶类似相 (W 相) 和 Ti-Zr-Ni 准晶都位于 $e/a=1.20$ 等电子浓度线附近, 且三元准晶的成分区也沿着该等电子浓度线伸展, 显示出了与 Al 基三元准晶系相图相近的准晶“等电子浓度线”特征, 它同样可以反映出 Ti-Zr-Ni 准晶与其类似相

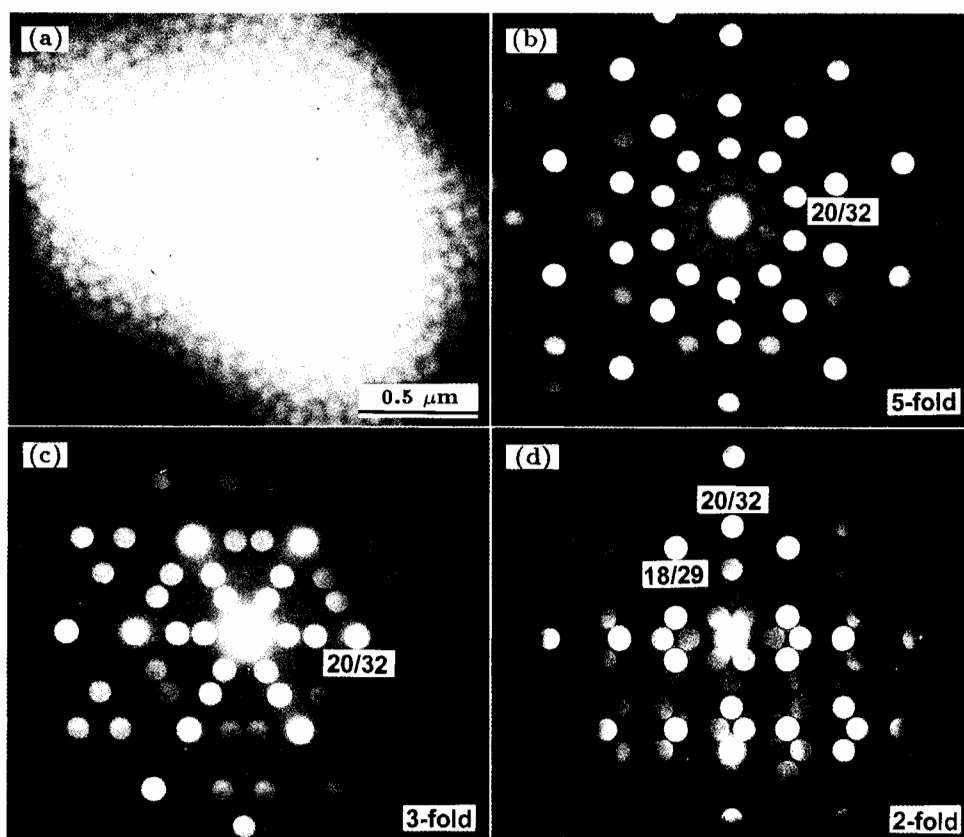


图4 $Ti_{40}Zr_{40}Ni_{20}$ 准晶合金的明场像和选区电子衍射谱

Fig.4 Bright field image and SAED patterns of the as-cast $Ti_{40}Zr_{40}Ni_{20}$ bulk quasicrystal (a) bright field image (b) EDP of 5-fold (c) EDP of 3-fold (d) EDP of 2-fold SAED

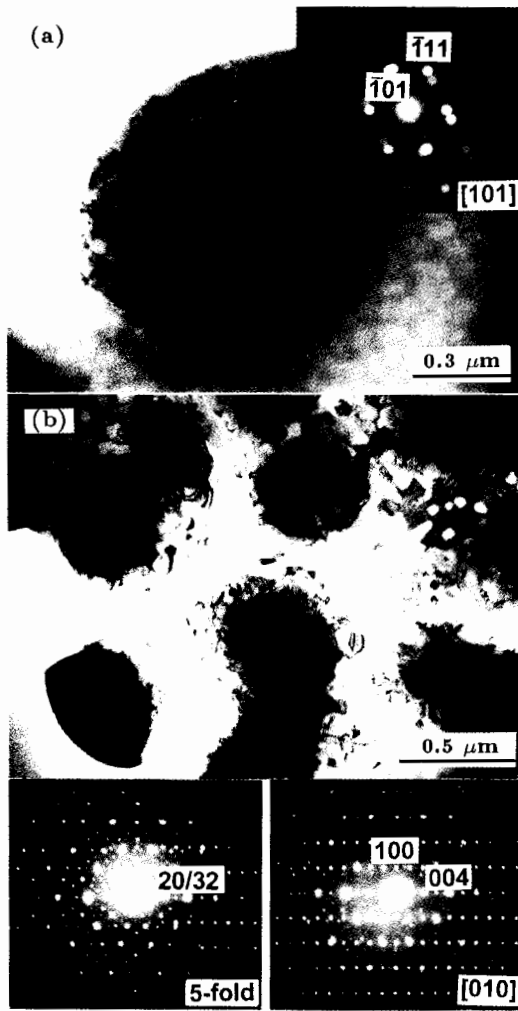


图 5 Ti₆₅Zr₁₅Ni₂₀ 准晶合金的明场像和选区电子衍射谱
 Fig.5 Bright field images and SAED patterns of the as-cast Ti₆₅Zr₁₅Ni₂₀ alloy
 (a) α-Ti(Zr)(gray)+I-phase (b) C14 (dark)+I-phase

在原子 / 电子结构上的相关性 [13,14]。不同的是，Al 系准晶相图中准晶“等电子浓度线”的两端点（即与二元子系统的交点）处都有二元准晶类似相形成，而 Ti-Zr-Ni 系 $e/a=1.20$ 等电子浓度线的端点（成分为 Ti₈₀Ni₂₀ 和 Zr₈₀Ni₂₀）处并无合金相存在，本文的实验结果也证实这些成分点处只形成了由 Ti(Zr) 固溶体与 Ti₂Ni(或 Zr₂Ni) 相构成的伪共晶组织。

另一方面，Ti-Zr-Ni 准晶的理想成分符合三元准晶系相图的“变电子浓度线”特征，即 Ti₄₀Zr₄₀Ni₂₀ 准晶成分点还落在由二元准晶和第三组元定义的准晶变电子浓度线上。如图 7 所示，Ti-Zr-Ni 准晶中存在两条准晶变电子浓度线，分别由 Ti₂Ni-Zr 和 Zr₂Ni-Ti 定义，这里，Ti₂Ni 为二元亚稳准晶成分 [15,16]，而 Zr₂Ni 合金在快冷下可形成 Ti₂Ni 型立方相结构，它在原子结构

上与二元准晶密切相关 [17]。Ti-Zr-Ni 准晶的理想成分 Ti₄₀Zr₄₀Ni₂₀ 就位于 $e/a=1.20$ 等电子浓度线与这两条准晶变电子浓度线交点处。最近研究表明，三元准晶系的“变电子浓度线”特征实际反映的是二十面体基础团簇发展形成稳定三元准晶或大单胞类似相的生长路径 [18]。

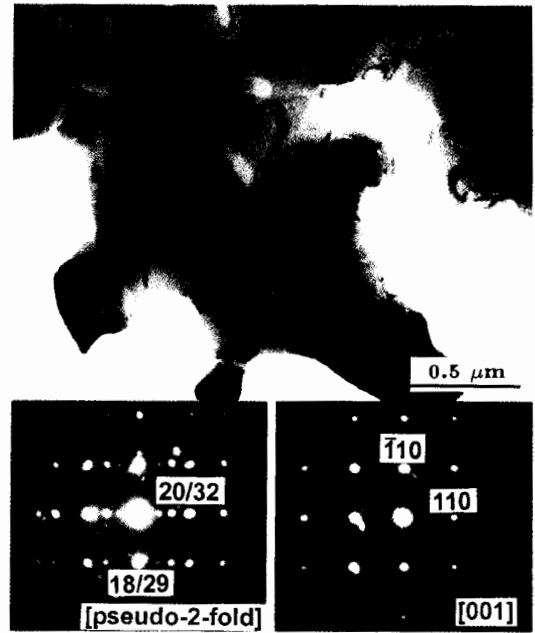


图 6 Ti₃₀Zr₅₀Ni₂₀ 准晶合金的明场像和选区电子衍射谱
 Fig.6 Bright field image and SAED patterns of the as-cast Ti₃₀Zr₅₀Ni₂₀ alloy. The phases are identified as the β-Ti(Zr) (dark)+I-phase which have orientation of $\langle 001 \rangle_{\beta} \parallel \langle \text{pseudo-2-fold} \rangle$; and $\{110\}_{\beta} \parallel \{18/29\}$;

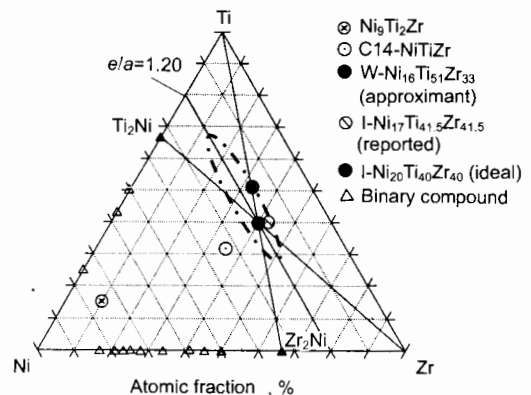


图 7 Ti-Zr-Ni 系成分相图
 Fig.7 Ternary phase formation section for Ti-Zr-Ni alloys (the dot-dash line showing the phase field of Ti-Zr-Ni quasicrystals revealed by this work). The ideal quasicrystals-forming composition I-Ti₄₀Zr₄₀Ni₂₀ to be just at the crossing point of the e/a constant and e/a -variant lines

3 结论

吸铸法可在很宽的成分区间 ($\text{Ti}_x\text{Zr}_{100-x}$) $_{100-y}\text{Ni}_y$, $43.75\% \leq x \leq 81.25\%$, $17\% \leq y \leq 20\%$) 内获得 Ti-Zr-Ni 准晶合金. Ti-Zr-Ni 准晶的成分特征研究表明: 以过渡金属为基的 Ti-Zr-Ni 准晶系也具有与 Al 基三元准晶相似的相图特征, 一方面, Ti-Zr-Ni 准晶与其类似相一起构成准晶“等电子浓度线”现象; 同时, 三元准晶成分满足准晶“变电子浓度线”特征, 形成准晶的理想成分 $\text{Ti}_{40}\text{Zr}_{40}\text{Ni}_{20}$ 位于准晶等电子浓度线与变电子浓度线交点处, 其电子浓度为 1.20.

参考文献

- [1] Dong C, Perrot A, Dubois J M, Belin E. *Mater Sci Forum*, 1994; 150/151: 403
- [2] Dong C. *Scr Mater*, 1995; 33: 239
- [3] Qiang J B, Wang D H, Bao C M, Wang Y M, Xu W P, Song M L, Dong C. *J Mater Res*, 2001; 16: 2653
- [4] Qiang J B, Wang Y M, Chen W R, Dong C. *J Mater Res Sin*, 2002; 16: 500
(羌建兵, 王英敏, 陈伟荣, 董 闯. 材料研究学报, 2002; 16: 500)
- [5] Wang Y M, Qiang J B, Wong C H, Shek C H, Dong C. *J Mater Res*, 2003; 18: 642
- [6] Kelton K F, Kim W J, Stroud R M. *Appl Phys Lett*, 1997; 70: 3230
- [7] Viano A M, Maizoub E H, Stroud R M, Kramer M J, Mixture S T, Gibbons P C, Kelton K F. *Philos Mag*, 1998; A78: 131
- [8] Sibirtsev S A, Chebotnikov V N, Molokanov V V, Kovneristy Y K. *JETP Lett*, 1988; 47: 744
- [9] Molokanov V V, Chebotnikov V N. *J Non-Crystalline Solids*, 1990; 117/118: 789
- [10] Yi S, Kim D H. *J Mater Res*, 2000; 15: 892
- [11] Lee G W, Croat T K, Gangopadhyay A K, Kelton K F. *Philos Mag Lett*, 2002; 82: 199
- [12] Cahn J W, Shechtman D, Gratias D. *J Mater Res*, 1986; 1: 13
- [13] Hennig R G, Majzoub E H, Carlsson A E, Kelton K F, Henley C L, Yelon W B, Mixture S. *Mater Sci Eng*, 2000; A294-296: 361
- [14] Belin-Ferre E, Hennig R G, Dankhazi Z, Sadoc A, Kim J Y, Kelton K F. *J Alloy Compds*, 2002; 342: 337
- [15] Zhang Z, Ye H Q, Kuo K H. *Philos Mag*, 1985; A52: L49
- [16] Nagarajan R, Aoki K, Chattopadhyay K. *Mater Sci Eng*, 1994; A179/180: 198
- [17] Yang Q B. *Philos Mag Lett*, 1988; 57: 171
- [18] Qiang J B, Wang Y M, Wang D H, Kramer M J, Dong C. *J Non-Crystalline Solids*, 2004; 334-335: 223