

Zr-Fe-Cu 三元系 700 °C 等温截面

张 敏^{1,2}, 罗文彬^{1,2}, 丁佳婷¹, 陈红梅¹, 欧阳义芳¹, 袁改焕³, 祝金明², 梁建烈²

(1. 广西大学, 广西 南宁 530004)

(2. 广西民族大学, 广西 南宁 530006)

(3. 国核宝钛铝业股份公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘 要: 利用 X 射线粉末衍射 (XRD), 扫描电子显微镜 (SEM) 和能谱分析 (EDX) 等方法建立了 Zr-Fe-Cu 三元系 700 °C 等温截面。证实此截面存在 2 个三元固溶相 $Zr(Fe, Cu)$ 和 $Zr_2(Fe, Cu)$, 分别用 τ_1 和 τ_2 表示。确定体系中存在 7 个稳定二元化合物 Fe_2Zr 、 $FeZr_3$ 、 $CuZr_2$ 、 $Cu_{10}Zr_7$ 、 Cu_8Zr_3 、 $Cu_{51}Zr_{14}$ 、 Cu_5Zr , 其中 $Cu_{51}Zr_{14}$ 对第三组元表现出较大的固溶替代, 体系中不存在 $Fe_{23}Zr_6$ 相。

关键词: 相图; Zr-Fe-Cu; X 射线衍射

中图分类号: TG113.14

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)10-2877-06

锆合金具有良好的耐腐蚀性能和高温力学性能, 广泛用作核反应堆燃料包壳材料^[1]。Fe 是锆合金的重要合金元素, 如 Zr-2、Zr-4、ZIRLO 合金、以及中国研制的 N18、N36 合金和韩国研制的 HANA-3、HANA-4 合金中都含有 Fe, 含 Fe 锆合金具有良好的耐腐蚀性能^[2]。由于添加了 Cu, HANA-3(Zr-0.4Sn-1.5Nb-0.1Fe-0.1Cu, 质量分数, %)合金表现出比 Zr-4 合金更优异的耐腐蚀性能^[3]。Zr-Fe-Cu 是一种潜在的、具备大块非晶形成能力的合金, 研究发现, $(Zr_xCu_{100-x})_{0.8}(Fe_{40}Al_{60})_{0.2}$ 系统中的 $Zr_{60}Cu_{20}Fe_{20}$ 基有利于形成四元大块非晶合金^[4]。

Stein 等人^[5]确定 Zr-Fe 体系存在 4 个中间二元化合物, 分别为 α - Fe_2Zr 、 β - Fe_2Zr 、 $FeZr_2$ 、 $FeZr_3$, 其中 $FeZr_2$ 为高温相, 存在于 780~951 °C 之间。 $Fe_{23}Zr_6$ 并非 Zr-Fe 体系的稳定相, 而是氧稳定相。Zr-Cu 二元体系存在 6 个二元合金化合物^[6], 分别为: $CuZr_2$ 、 $Cu_{10}Zr_7$ 、 $CuZr$ 、 Cu_8Zr_3 、 $Cu_{51}Zr_{14}$ 、 Cu_5Zr 。B2 结构的 $CuZr$ 为高温相, 在 730 °C 共析分解为 $CuZr_2$ 和 $Cu_{10}Zr_7$ ^[6]。Liu 等人^[7]证实 $CuZr$ 相在 550 °C 退火 24 h 后分解为层片状 $CuZr_2$ 和 $Cu_{10}Zr_7$ 两相共析组织。Fe-Cu 是个简单二元合金体系^[8]。

2008 年, Michalik^[9]在研究 $Zr_{60}Cu_{20}Fe_{20}$ 合金的非晶结构和快速凝固的相变时发现, 在 415 和 635 °C 下, 合金发生晶型转变, 生成稳定的立方 $Zr(Fe, Cu)$ 相和四方 $Zr_2(Fe, Cu)$ 相, 其晶体结构分别与 $CuZr$ 和 $FeZr_2$

相同, 但晶格常数不同。2013 年, Huang 等人^[10]研究了 Zr-Fe-Cu 体系 1000、1100 和 1200 °C 下的等温截面, 未发现该体系含有三元化合物。认为 $Fe_{23}Zr_6$ 是平衡相, 不属于氧稳定相。

在工业上, 锆合金热轧温度一般为 700~850 °C, 真空退火再结晶温度在 580~750 °C 之间^[11]。目前尚未发现 Zr-Fe-Cu 三元合金体系低温条件下相关关系的公开文献报道。研究 Zr-Fe-Cu 体系的相图, 将为解释相关锆合金的相变过程, 为面向计算辅助设计的新型锆合金热力学数据库提供基础数据, 并为开发新型锆合金提供指导。

1 实 验

实验所用原料为纯度 99.8% 的核级海绵锆、纯度 99.9% 的 Fe 和纯度 99.95% 的铜。每个合金样品总重量为 2g。合金在氩气保护下进行电弧熔炼。为保证成分均匀, 第 1 次熔炼后, 将所熔铸锭取出, 剪成小块, 然后再次熔炼, 每个样品至少熔炼 3 次。完成合金制备后, 将样品封入真空石英玻璃管中进行均匀化退火。热处理温度参考 Zr-Cu 体系和 Zr-Fe 体系二元合金相图的相关相变温度确定, Zr-Fe-Cu 体系中富锆区和富铁区样品熔点较高, 故将富锆区和富铁区样品 1、2、3 和 27 号样品置于 1000 °C 中, 进行均匀化退火 10 d, 随后以 10 °C/h 的速率降到 700 °C 保温 40 d; 其余样品置于 850 °C 中, 进行均匀化退火 20 d, 然后以 10 °C/h

收稿日期: 2016-10-14

基金项目: 广西自然科学基金 (2013GXNSFAA019315); 国家自然科学基金 (51301045, 11464001)

作者简介: 张 敏, 男, 1989 年生, 硕士, 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004, 电话: 0771-3262510, E-mail: 277601856@qq.com

的速率降到 700 °C 平衡态退火 30 d, 最后将样品淬入冰水。

平衡合金样品分成两部分, 一部分用于 X 射线衍射分析, 另一部分用于金相分析。X 射线衍射分析是在 XD-3 型(北京普析) X 射线衍射仪上进行, 辐射源为 Cu K α , 工作电压为 40 kV, 工作电流为 30 mA, 扫描速度选择 2 %/min, 扫描角度 $2\theta=20\sim 80^\circ$ 。金相分析首先使用常规的光学显微镜观察合金试样组织形貌, 结合 XRD 分析结果选择合适合金进行扫描电子显微镜分析。扫描电镜分析是在 Zeiss EVO18 上进行, 成分分析是在布鲁克能谱仪(EDX)上进行。

2 结果与讨论

图 1 是 Zr-Fe-Cu 三元系 700 °C 等温截面。此截面存在 2 个三元相, 分别是 Zr(Fe,Cu)相, 用 τ_1 表示; 以及 Zr₂(Fe,Cu)相, 用 τ_2 表示。 τ_1 属于立方结构, τ_2 属于四方结构, 晶体结构分别与 ZrCu 和 FeZr₂ 相同, 这与 Michalik^[9]等人的结果是一致的。本次实验并未观察到 Fe₂₃Zr₆。利用 X 射线衍射 (XRD), 扫描电镜 (SEM) 和能谱等实验方法对样品进行分析, 部分合金试样的实验结果数据列于表 1。

2.1 三元相

Michalik 等人^[9]研究了 Zr₆₀Cu₂₀Fe₂₀ 非晶合金的相变, 发现在 415 和 635 °C 时, 合金生成稳定的立方 Zr(Fe, Cu)相和四方 Zr₂(Fe, Cu)相, 分别用 τ_1 和 τ_2 表示。有关 τ_1 和 τ_2 相的文献报道很少, τ_1 和 τ_2 相在 Zr-Fe-Cu 三元系 700 °C 时是否稳定存在, 尚不明确。在已有实验结果下, 制备一系列 τ_1 单相合金样品, 样品置于 800 °C 均匀化退火 10 d, 然后以 10 °C/h 的速率降到 700 °C 退火 40 d, 最后将样品淬入冰水中。利用 X 射线衍射 (XRD)、扫描电镜 (SEM) 和能谱分析等实验方法对 τ_1 单相合金样品进行分析, 实验结果列于表 2。

图 2a 和 2b 分别为 30 号合金(Zr₅₀Fe₂₀Cu₃₀)的 X 射线衍射图谱和扫描电子显微镜背散射电子照片(BSE)。XRD 分析确定 30 号合金存在 Fe₂Zr 相, 扣除 Fe₂Zr 相的 X 射线衍射峰后, 剩余的衍射峰可被 CuZr 标定。扫描电镜分析证实, 30 号合金由两相组成, 基体相成分为 Zr_{52.7}Fe_{18.9}Cu_{27.4}, 对应为 Zr(Fe,Cu)相, 即 τ_1 , 黑色圆点为 Fe₂Zr 相。 τ_1 相是 Fe 固溶进 CuZr 相后形成的三元相, 其衍射峰最高, 为基体相, 这与扫描电镜能谱分析结果一致。XRD 分析和能谱分析表明, 29~35 号合金中都存在 τ_1 相。29~33 号合金中相组成都为 Fe₂Zr 和 τ_1 相, 结果见表 2。CuZr 相 730 °C 时分解为 CuZr₂ 和 Cu₁₀Zr₇ 相^[6]。Fe 和 Cu 原子半径差 $\Delta r < 15\%$,

有利于形成溶解度较大的固溶体, 高温相 CuZr 中的 Cu 原子被 Fe 原子替代, 形成三元相 Zr(Fe, Cu), 即 τ_1 。随着第三组元 Fe 的加入, 二元共析点在三维空间变成共析线, 共析温度降低, 导致三元相 Zr(Fe, Cu)在 700 °C 下稳定存在。按照 Stein^[5]等人的结果, 高温相 FeZr₂ 只是在 780 °C 以上稳定存在。同样地, 由于第三组元 Cu 的加入, 使其共析分解温度降低, 因此, 可以在 700 °C 观察到固溶相 Zr₂(Fe,Cu)。

2.2 相关系

图 3a 和 3b 分别为 6 号合金(Zr₇₅Fe₁₀Cu₁₅)扫描电镜的背散射电子照片和能谱分析线扫描结果。6 号合金由 3 相组成, 分别为 α -Zr 相、CuZr₂ 相和 τ_2 相。图 3a 中白色相为 α -Zr, 其成分为 Zr_{98.7}Fe_{0.3}Cu_{1.0}。在背散射电子模式下, 每个物相的衬底跟该相的平均相对原子量有关。CuZr₂ 相和 τ_2 相平均相对原子质量比较接近, 导致 CuZr₂ 相和 τ_2 相在扫描电镜背散射模式下难以区分。为区分这两个物相, 沿图 3a 白色箭头方向进行线扫描的成分分析, 结果如图 3b 所示。图 3b 中, 左侧物相 Cu 原子含量多于 Fe 原子, 当到达箭头所示相界位置, 右边属于另一个物相, 其 Fe 原子含量多于 Cu 原子。箭头左侧物相成分为 Zr_{69.5}Fe_{3.5}Cu_{27.0}, 对应 CuZr₂ 相; 箭头右侧物相成分 Zr_{66.9}Fe_{21.3}Cu_{11.5}, 此即为三元相 τ_2 。6 号合金的分析结果说明, Zr-Fe-Cu 三元合金体系存在 (α -Zr)+CuZr₂+ τ_2 的三相区。根据 Zr-Fe 二元相图^[5], FeZr₃ 在 700 °C 时是稳定的, 按照三元相图相区分布规律, 可以确定 Zr-Fe-Cu 体系存在 (α -Zr)+FeZr₃+ τ_2 的三相区。

图 4a 和 4b 分别为 10 号合金(Zr₅₅Fe₂₅Cu₂₀)扫描电镜的背散射电子照片(BSE)和 X 射线衍射图谱。合金由 3 相组成, 黑色相成分为 Zr_{32.8}Fe_{62.9}Cu_{1.2}, 对应为 Fe₂Zr 相; 基体相成分为 Zr_{66.3}Fe_{24.7}Cu_{9.6}, 对应为 τ_2 相; 灰

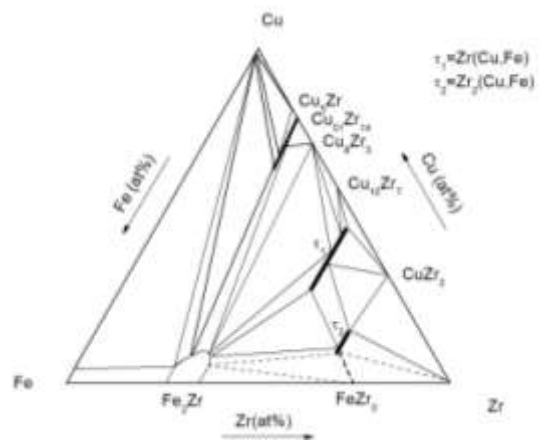


图 1 Zr-Fe-Cu 三元系 700 °C 等温截面

Fig.1 Isothermal section of the Zr-Fe-Cu system at 700 °C

表 1 Zr-Fe-Cu三元合金X射线衍射和扫描电镜及能谱分析结果

Table 1 Results of Zr-Fe-Cu alloys analyzed by XRD and SEM/EDX

No.	Composition/at%						Phase identified	EDX result/at%		
	Nominal			EDX result				Zr	Fe	Cu
	Zr	Fe	Cu	Zr	Fe	Cu				
1	95	3	2	96.1	1.7	2.2	(α -Zr)	99.7	0.0	0.3
2	90	2	8	96.6	0.4	3.0	τ_2	66.8	22.4	10.8
							(α -Zr)	99.7	0.0	0.3
3	90	7	3	95.2	4.2	0.6	CuZr ₂	67.1	1.9	31.0
							(α -Zr)	99.7	0.2	0.1
4	75	15	10	75.3	14.1	10.6	CuZr ₂	67.1	2.7	30.2
							τ_2	67.1	22.1	10.8
5	75	5	20	74.4	4.8	20.8	(α -Zr)	98.3	0.4	1.3
							CuZr ₂	68.3	3.5	28.2
6	75	10	15	75.7	9.8	14.5	τ_2	66.9	22.4	10.7
							(α -Zr)	98.4	0.2	1.4
7	65	20	15	65	20.6	14.3	CuZr ₂	65.6	3.3	31.1
							τ_2	66.9	22.5	10.6
8	63	15	22	66.2	15.4	22.4	(α -Zr)	98.7	0.3	1.0
							CuZr ₂	69.5	3.5	27
9	60	10	30	60.6	9.5	29.9	τ_2	67.2	21.3	11.5
							τ_1	50.9	21.0	28.1
10	55	25	20	53.5	27.5	19.0	CuZr ₂	67.2	21.4	11.4
							τ_2	68.6	3.4	28.0
11	55	10	35	55.6	9.6	33.8	τ_1	50.4	21.2	28.4
							CuZr ₂	67.6	3.0	29.4
12	55	15	30	57.3	13.2	29.5	τ_2	68.6	17.2	14.2
							τ_1	48.3	21.0	30.7
13	53	20	27	51.1	22.1	26.8	Fe ₂ Zr	32.8	62.9	4.3
							τ_2	66.3	24.1	9.6
14	50	5	45	49.9	5.7	44.4	τ_1	49.6	22.5	27.9
							CuZr ₂	66.3	1.5	32.2
15	50	15	35	48.3	16.4	35.5	τ_1	54.7	13.3	32.0
							CuZr ₂	65.3	3.4	31.3
16	45	25	30	48.5	25.7	25.8	τ_1	49.2	20.3	30.5
							τ_2	66.5	21.1	13.4
17	40	5	55	40.1	4.8	55.1	CuZr ₂	67.5	4.1	28.4
							τ_1	50.3	20.4	29.3
18	40	40	20	43.1	36.9	20.0	Cu ₁₀ Zr ₇	41.8	1.8	56.4
							τ_1	49.8	5.4	44.8
19	40	40	20	43.1	36.9	20.0	τ_1	54.4	12.7	32.9
							Fe ₂ Zr	33.4	56.7	9.9
20	66.8	22.4	10.8	64.9	22.89	12.20	τ_1	49.1	13.7	37.2
							Fe ₂ Zr	34.3	55.6	10.1
21	28	32	40	28.3	33.3	38.4	Cu ₈ Zr ₃	28.5	1.3	70.2
							τ_1	50.1	8.3	41.6
22	26	14	60	24.9	16.9	58.2	Fe ₂ Zr	33.7	61.4	4.9
							τ_1	48.0	15.9	36.1
23	20	10	70	20.0	9.3	70.7	τ_1	52.1	22.0	25.9
							τ_2	67.3	22.1	10.6
24	21	16	64	22.0	15.0	63.0	Fe ₂ Zr	31.5	66.6	7.9
							Cu ₅₁ Zr ₁₄	22.6	2.4	75.0
25	15	55	30	16.8	68.0	15.2	Fe ₂ Zr	31.3	61.0	7.7
							Cu ₅₁ Zr ₁₄	21.5	1.5	77.0
26	15	15	70	20.2	18.9	60.9	(Cu)	3.2	1.6	95.2
							Cu ₅₁ Zr ₁₄	21.2	18.6	60.2
27	10	80	10	11.3	82.7	6.0	Cu ₅ Zr	18.0	1.7	80.3
							Fe ₂ Zr	33.6	61.2	5.2
28	5	30	65	6.8	32.1	61.1	Cu ₅₁ Zr ₁₄	19.4	2.8	77.8
							(Cu)	0.4	2.2	97.4
29	5	30	65	6.8	32.1	61.1	Fe ₂ Zr	26.3	70.8	2.9
							(Fe)	0.0	97.5	2.5
30	5	30	65	6.8	32.1	61.1	(Cu)	0.2	6.0	93.8
							Fe ₂ Zr	30.0	61.0	9.0
31	5	30	65	6.8	32.1	61.1	Cu ₅₁ Zr ₁₄	20.2	3.3	76.5
							(Cu)	0.1	1.6	98.3
32	5	30	65	6.8	32.1	61.1	Fe ₂ Zr	26.2	70.1	3.7
							(Fe)	0.0	93.9	6.1
33	5	30	65	6.8	32.1	61.1	Fe ₂ Zr	26.2	68.6	5.2
							(Fe)	0.0	93.9	6.1

表2 τ_1 单合金X射线衍射和扫描电镜及能谱分析结果

Table 2 Results of τ_1 alloys analyzed by XRD and SEM/EDX

No.	Composition/ at%			Phase identified	EDX result/at%			Space group
	Zr	Fe	Cu		Zr	Fe	Cu	
29	50	22	27	τ_1 Fe_2Zr				Pm-3m Fd-3m
30	50	20	30	τ_1 Fe_2Zr	52.7	18.9	27.4	Pm-3m Fd-3m
31	50	15	35	τ_1 Fe_2Zr				Pm-3m Fd-3m
32	50	13	37	τ_1 Fe_2Zr				Pm-3m Fd-3m
33	48	22	30	τ_1 Fe_2Zr	52.2	16.4	31.4	Pm-3m Fd-3m
34	52	15	33	τ_1 $CuZr_2$				Pm-3m I4/mmm
35	53	13	34	τ_1 $CuZr_2$	50.8	15.6	35.6	Pm-3m I4/mmm

(Fe) 0.0 95.6 4.4
(Cu) 0.0 4.3 95.7
个合金都由 τ_1 和 $CuZr_2$ 相构成。这 3 个合金的 τ_1 相都

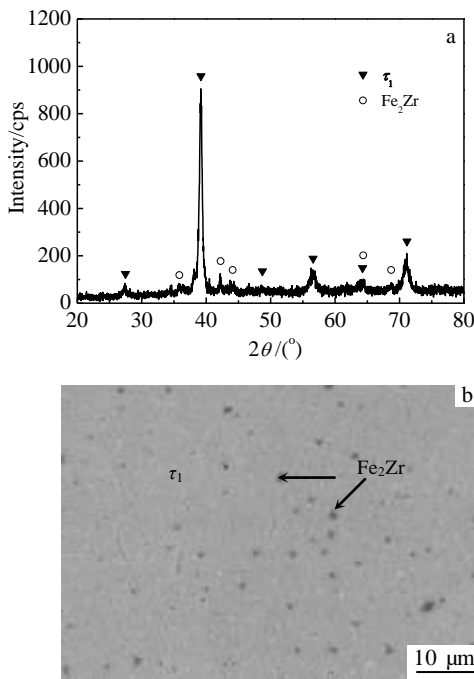


图2 30号合金 XRD 图谱和扫描电镜背散射电子像
Fig.2 XRD pattern (a) and SEM BSE image (b) of alloy 30

色相成分为 $Zr_{49.6}Fe_{22.5}Cu_{27.9}$, 为 τ_1 相。XRD 分析确定 10 号合金存在 Fe_2Zr 相和 τ_1 相, 扣除 Fe_2Zr 相和 τ_1 相的 X 射线衍射峰后, 剩余的衍射峰可被四方结构 $FeZr_2$ 标定, 即 τ_2 相。图 4c 和 4d 分别为 11 号合金($Zr_{55}Fe_{10}Cu_{35}$) 和 12 号合金($Zr_{55}Fe_{15}Cu_{30}$)扫描电镜背散射电子像。这 2

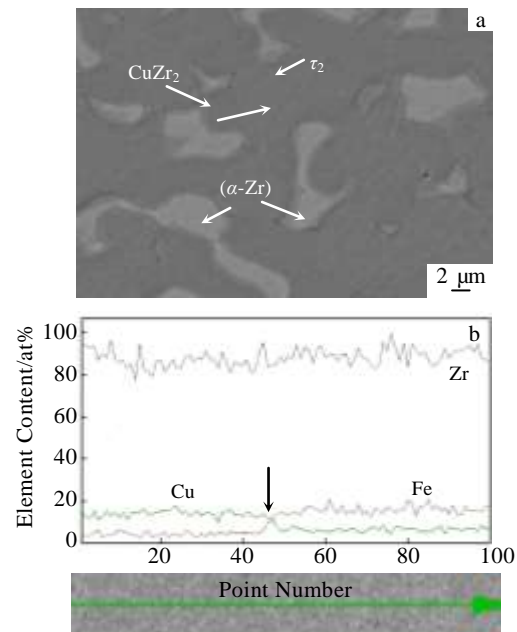


图3 6号合金扫描电镜背散射电子像和 EDX 线扫描结果
Fig.3 BSE image (a) and EDX result (b) of alloy 6

存在表面浮凸现象, 这是 τ_1 相发生的马氏体相变而导致的, 这与文献[12,13]的研究结果一致。10 号合金的分析结果表明, Zr-Fe-Cu 三元合金体系存在 $Fe_2Zr+\tau_1+\tau_2$ 三相区。

图 5a 为 23 号合金($Zr_{20}Fe_{10}Cu_{70}$), 图 5b 为 26 号合金($Zr_{15}Fe_{15}Cu_{70}$)显微组织的扫描电子显微镜背散射像(BSE)。23 号合金和 26 号合金都为富铜区合金。23 号合金由 3 相构成, 黑色圆点成分为 $Zr_{3.2}Fe_{1.6}Cu_{95.2}$, 对应是 Cu 相; 灰白色相成分 $Zr_{18.0}Fe_{1.7}Cu_{80.3}$, 为 Cu_5Zr 相; 灰色相成分 $Zr_{21.2}Fe_{18.6}Cu_{60.2}$, 确定为 $Cu_{51}Zr_{14}$ 相。26 号合金同样是由 3 相构成, 分别为 Fe_2Zr 、 $Cu_{51}Zr_{14}$ 和 Cu 组成, 各相成分见表 1。因此, Zr-Fe-Cu 三元合金系存在 $Cu+Cu_5Zr+Cu_{51}Zr_{14}$ 和 $Cu_{51}Zr_{14}+Cu+Fe_2Zr$ 2 个三相区, Fe 元素在 $Cu_{51}Zr_{14}$ 存在较大固溶度。

图 6a 和 6b 分别为 28 号合金($Zr_5Fe_{30}Cu_{65}$)的 X 射线衍射图谱及其显微组织的背散射电子像。XRD 分析确定合金由 Fe_2Zr 、Fe 和 Cu 3 相组成; 图 6b 中, 黑色圆点相为 Fe, 灰色相为 Cu, 灰白色相为 Fe_2Zr 。在当前的工作中未发现 $Fe_{23}Zr_6$, 这与 Stein^[5]结论是一致

的, 与 Huang^[10]等人结果不同。

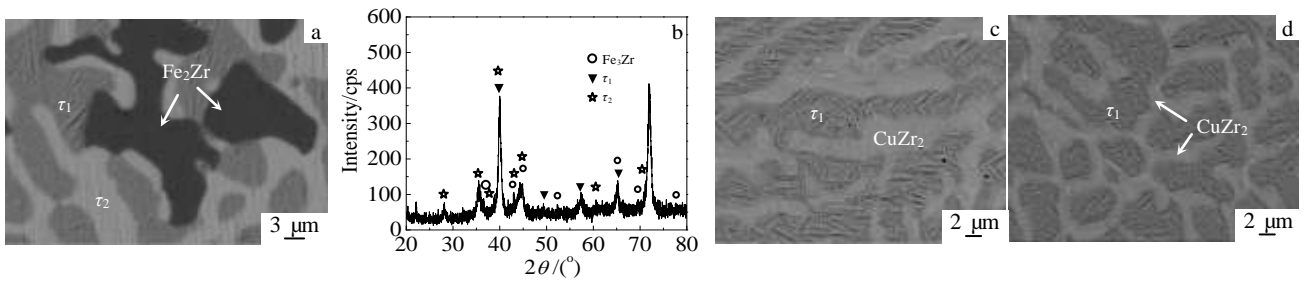


图 4 10 号合金扫描电镜背散射电子像和 X 射线衍射图谱及 11 号合金和 12 号合金扫描电镜背散射电子像

Fig.4 BSE image (a) and XRD pattern (b) of alloy 10, and BSE images of alloy 11 (c) and 12 (d)

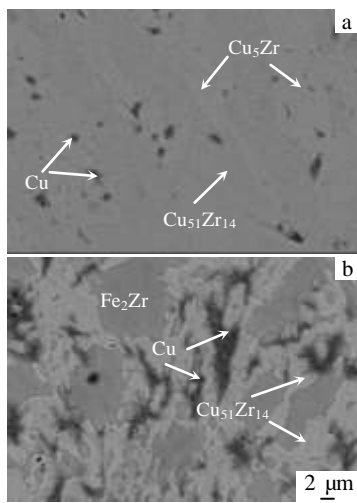


图 5 23 号合金, 26 号合金背散射电子像

Fig.5 BSE images of alloy 23 (a) and 26 (b)

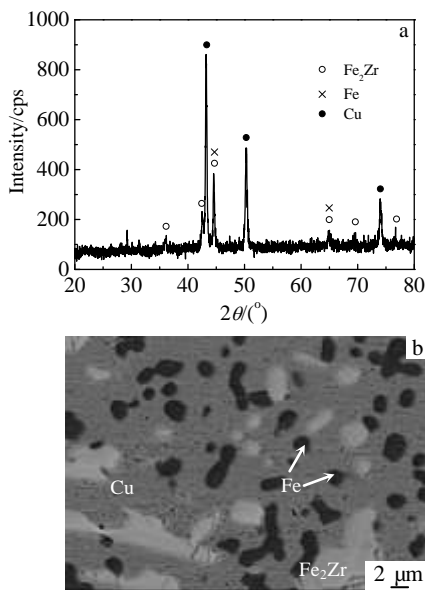


图 6 28 号合金 X 射线衍射图谱和扫描电镜背散射电子像

Fig.6 XRD pattern (a) and BSE image (b) of alloy 28

3 结 论

1) 在 700 °C 下, Zr-Fe-Cu 三元系由 12 个单相区、23 个两相区和 12 个三相区组成。12 个三相区分别为 $(\alpha\text{-Zr})+\text{CuZr}_2+\tau_2$ 、 $(\alpha\text{-Zr})+\text{FeZr}_3+\tau_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{Zr}+\tau_1+\tau_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{Zr}+\text{FeZr}_3+\tau_2$ 、 $\tau_1+\tau_2+\text{CuZr}_2$ 、 $\tau_1+\text{CuZr}_2+\text{Cu}_{10}\text{Zr}_7$ 、 $\text{Cu}_{10}\text{Zr}_7+\tau_1+\text{Cu}_8\text{Zr}_3$ 、 $\text{Cu}_8\text{Zr}_3+\tau_1+\text{Fe}_2\text{Zr}$ 、 $\text{Cu}_8\text{Zr}_3+\text{Fe}_2\text{Zr}+\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$ 、 $(\text{Cu})+\text{Cu}_5\text{Zr}+\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$ 、 $\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}+(\text{Cu})+\text{Fe}_2\text{Zr}$ 和 $\text{Fe}_2\text{Zr}+(\text{Cu})+(\text{Fe})$ 。

2) Zr-Fe-Cu 三元合金体系 700 °C 等温截面中, 体系中存在 2 个三元相 τ_1 和 τ_2 。 τ_1 是高温相 CuZr 中的 Cu 原子被 Fe 原子替代后形成的低温稳定相, τ_2 是高温相 FeZr_2 中的 Fe 原子被 Cu 原子替代后形成的低温稳定相。

参考文献 References

[1] Sabol G P, Kilp G R, Balfour M G *et al.* *ASTM Special Technical Publication*[J], 1989, 1023: 227
 [2] McDeavitt S M, Abraham D P, Park J Y. *Journal of Nuclear Materials*[J], 1998, 257(1): 21
 [3] Park J Y, Choi B K, Yoo S J *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2006, 359(1): 59
 [4] Wang W H, Lewandowski J J, Greer A L. *Journal of Materials Research*[J], 2005, 20(9): 2307
 [5] Stein F, Sauthoff G, Palm M. *Journal of Phase Equilibria* [J], 2002, 23(6): 480
 [6] Okamoto H. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*[J], 2008, 29(2): 204
 [7] Liu Z Y, Aindow M, Hriljac J A *et al.* *Journal of Materials Science*[J], 2002, 37(4): 745
 [8] Schmid R, Chang Y A, *Metallurgical Transaction A*[J], 1984, 15: 1921
 [9] Michalik S, Saksl K, Sovák P *et al.* *Journal of Alloys and*

- Compounds*[J], 2009, 478(1): 441
- [10] Huang W L, Yu Y, Yang S Y *et al. Journal of Phase Equilibria and Diffusion*[J] 2013, 34(6): 438
- [11] Liu Jianzhang(刘建章). *Nuclear Structural Materials*(核结构材料)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007
- [12] Zhou S H, Napolitano R E, *Scripta Materialia*[J], 2008, 59 (10): 1143
- [13] Schryvers D, Firstov G S, Seo J W *et al. Scripta Materialia* [J], 1997, 36(10): 1119

Isothermal Section of Zr-Fe-Cu Ternary System at 700 °C

Zhang Min^{1,2}, Luo Wenbin^{1,2}, Ding Jiating¹, Chen Hongmei¹, Ouyang Yifang¹, Yuan Gaihuan³, Zhu Jinming²,
Liang Jianlie²

(1. Guangxi University, Nanning 530004, China)

(2. Guangxi University of Nationality, Nanning 530006, China)

(3. State Nuclear Bao Ti Zirconium Industry Company, Baoji 721014, China)

Abstract: The isothermal section of the Zr-Fe-Cu ternary system at 700 °C was investigated by X-ray diffraction, scanning electron microscope and energy disperse analysis. Two Zr-Fe-Cu ternary phase, Zr(Fe,Cu) and Zr₂(Fe,Cu), named τ_1 and τ_2 , respectively, are found in this section. Seven binary phases, Fe₂Zr, FeZr₃, CuZr₂, Cu₁₀Zr₇, Cu₈Zr₃, Cu₅₁Zr₁₄ and Cu₅Zr, are confirmed to be stable at this temperature. Large amount of Fe (18.6 at%) is observed to solute in Cu₅₁Zr₁₄. In addition, the oxygen stabilized phase Fe₂₃Zr₆ isn't observed in Zr-Fe-Cu ternary system.

Key words: phase diagram; Zr-Fe-Cu; X-ray diffraction

Corresponding author: Liang Jianlie, Ph. D., Professor, School of Science, Guangxi University of Nationality, Nanning 530006, P. R. China, Tel: 0086-771-3262510, E-mail: Jianlieliang@126.com