

引文格式:李军,彭文静,李湘,等. 基于铝热还原法短流程制备 TiAl-M (M = Cr、Fe) 合金研究[J]. 中国有色冶金, 2025, 54(1): 23-29.

LI Jun, PENG Wenjing, LI Xiang, et al. Preparation of TiAl-M (M = Cr, Fe) alloy based on aluminum thermal reduction method[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(1): 23-29.

基于铝热还原法短流程制备 TiAl-M (M = Cr、Fe) 合金研究

李 军^{1,2,3,4}, 彭文静^{1,2}, 李 湘^{1,2}, 吴恩辉^{1,2,3,4}, 侯 静^{1,2},
徐 众^{1,2}, 马 兰^{1,2}, 杨绍利^{1,2}, 李 宏^{1,2}, 羊山贵^{1,2}

(1. 攀枝花学院 钒钛学院, 四川 攀枝花 617000; 2. 钒钛资源综合利用四川省重点实验室, 四川 攀枝花 617000;
3. 国家钒钛检测重点实验室, 四川 攀枝花 617000;
4. 四川省太阳能利用技术集成工程实验室, 四川 攀枝花 617000)

[摘 要] TiAl 基合金性能优异, 但由于海绵钛价格高昂, 使得 TiAl 基合金制备成本较高, 限制了 TiAl 基合金的应用。本文以 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 CrO_3 为原料, Al 为还原剂, 采用铝热还原法一步合成制备 TiAl-M (Cr、Fe) 合金, 并结合试验产物成分计算了合金、Ti、Fe 的收率, 得到以下主要结论。在温度 1 550 °C、Al/TiO₂ = 0.9、渣系比 CaO: Al₂O₃: CaF₂ = 40%: 40%: 20%、焙烧时间 30 min 的工艺参数条件下, 制备的 TiAl-Cr 合金与熔渣分离效果较好, 合金中 Cr 元素可以根据原料中 CrO₃ 配入量进行调控, 合金收率最高可以达到 88%, Ti 收率达到 92.4%, Cr 收率达到 99.5%, TiAl-Cr 合金主要物相为 Ti_3Al 和 Al_8Cr_5 。制备的 TiAl-Fe 合金脆性较大, TiAl-Fe 合金主要物相为 Ti_3Al 和 Al_6Fe 。

[关键词] TiAl 基合金; 钛白粉; 铝热还原; 一步合成; TiAl-Cr 合金; TiAl-Fe 合金

[中图分类号] TF823; TF125.2+2 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2025)01-0023-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2025.01.003

0 引言

TiAl 基合金具有密度低(与传统金属相比减重 40%~50%)、比弹性模量和比强度优异、高温下抗氧化能力和抗蠕变能力优良、强度和刚度优良的优势, 在航空航天、电力工程和汽车工业中的高温结构

件制造方面具有很大的应用潜力^[1-3], 因此, TiAl 基合金成为钛合金研究的热点。目前, TiAl 基合金主要以金属钛和金属铝为原料采用粉末冶金、铸造(铸锭)冶金等工艺进行制备。Kroll 法是目前生产海绵钛最成功、最主要的方法^[4], 但此工艺存在流程长、周期长、还原率低、还原剂价格高等问题, 造成海绵钛生产成本较高。为了进一步降低海绵钛的制备成本, 各国科学家探索了一些新的制备工艺, G. Z. Chen 等^[5]提出了熔盐电解 TiO_2 制备金属钛(FFC 法)工艺, 邹星礼等^[6]采用固体透氧膜工艺(SOM)制备钛及钛合金。虽然熔盐电解工艺具有过程简单、污染少和成本低等优点, 是一种新型绿色短流程冶金工艺, 但该方法由于不能连续化生产, 仍停留在实验室研究阶段, 未能实现工业化。

海绵钛价格高昂使得 TiAl 基合金制备成本较高, 限制了 TiAl 基合金的应用, 尤其是在民用领域

[收稿日期] 2024-10-20 [修订日期] 2024-11-19

[录用日期] 2024-11-20 [出版日期] 2025-02-01

[第一作者] 李军(1986—), 男, 重庆九龙坡人, 博士, 研究方向为钒钛合金材料及钒钛功能材料。

[基金项目] 精细化工助剂及表面活性剂四川省重点实验室项目(2023JXY01); 钒钛资源综合利用四川省重点实验室项目(2024FTSZ04); 太阳能利用技术集成及应用推广四川省高校实验室项目(SN240104); 2022 年攀西战略资源创新开发项目(LB-SK-HT23-0432); 材料腐蚀与防护四川省重点实验室开放基金项目(2022CL31); 绿色催化四川省高校重点实验室开放基金项目(LYJ2102)。

的应用。李军等^[7-8]开展了电铝热还原-真空电磁悬浮净化工艺制备 TiAl 合金的研究,系统研究了电铝热还原工艺参数对制备钛铝合金成分、物相、组织形貌的影响规律,成功制备了 TiAl 合金,并开展了真空电磁悬浮精炼 TiAl 合金研究,系统探索了真空精炼过程夹杂物在合金中的脱除规律,取得了一定的研究进展;研究发现通过引入第三合金元素,可以有效提高 TiAl 合金的综合性能,添加 Cr 元素可以有效提高 TiAl 合金塑性、高温抗氧化性等性能^[9-10],添加 Fe 元素可以改善 TiAl 合金的铸造性能^[11]。本文系统探索了以钛的氧化物和合金化元素(Cr、Fe)氧化物为原料,铝热还原法一步合成 TiAl-M(Fe, Cr)三元钛铝基合金可行性,以期降低 TiAl 基合金的制造成本,并为采用该工艺制备三元甚至多元 TiAl 基合金提供理论和数据参考。

1 试验介绍

1.1 试验药品及设备

试验原料主要有锐钛型钛白粉、铝粉、三氧化铬、三氧化二铁、氧化钙(造渣)、氟化钙(造渣),钛白粉购置于攀枝花某钛白粉厂, TiO_2 含量为 98.6%, 铝粉、三氧化铬、三氧化二铁、氧化钙、氟化钙均为市售分析纯。主要试验设备为高温箱式电阻炉,购置于鑫宇新材料科技有限公司(型号: SX2-914TP)。

1.2 试验步骤

将钛白粉、铝粉、造渣剂、合金化元素粉末按设计比例混合均匀,装入刚玉坩埚内放入箱式电阻炉内进行高温焙烧;反应结束后从炉内取出自然冷却,得到钛铝基合金和熔渣,送样分析。具体流程见图 1。

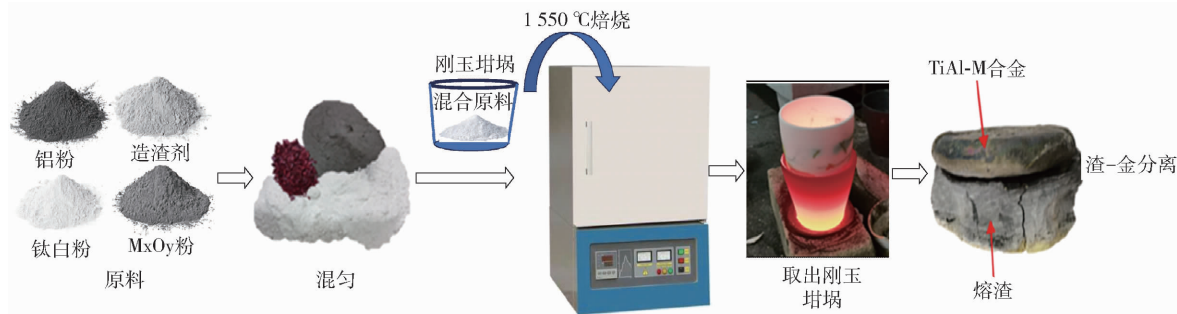


图 1 工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram

1.3 样品表征及分析

采用岛津 XRF-1800 型波长色散荧光光谱仪对制备的合金成分及熔渣成分进行分析,采用日本理学 D/max22500PC X 射线衍射仪对不同试验条件下制备的合金和还原渣进行物相结构分析。

2 热力学分析

Al 与各氧化物的主要反应方程式见表 1。用热力学软件 FactSage 计算并绘制各反应式的吉布斯自由能与温度的关系,见图 2。由图 2 可以看出, TiO_2 与 Al 还原是阶段进行的,先还原生成 Ti_2O_3 ,再生成 TiO 和 Ti。而 TiO 还原为 Ti 在热力学上是较为困难的,且在 1 100 °C 以上时吉布斯自由能开始变为正值,反应不能进行,造成钛收率较低。为了进一步提升钛的收率,需要进一步促进 TiO 转变为 Ti。用热力学软件 FactSage 计算并绘制了 TiO 与不同配铝量

反应的吉布斯自由能与温度的关系,见图 3。由图可知,随着配铝量增加,吉布斯自由能随温度变化曲线与零点线的交点一直向高温区域推移,当温度大于 2 100 °C 时, TiO 与 Al 反应生成 TiAl_3 和 TiAl 的吉布斯自由能才大于零,在试验选择的焙烧温度区间 TiO 可以与 Al 进行反应,进而提高合金钛的收率。

Al 与 CrO_3 和 Fe_2O_3 反应的标准吉布斯自由能在研究温度范围内都是负值,说明 Al 还原 CrO_3 和 Fe_2O_3 在热力学上是可行的,比在相同温度下 Al 还原 TiO_2 反应的吉布斯自由能变更负,说明 CrO_3 和 Fe_2O_3 比 TiO_2 优先被 Al 还原。故采用电铝热还原 TiO_2 、 CrO_3 和 Fe_2O_3 ,一步制成 TiAl-Cr 和 TiAl-Fe 合金在热力学上是可行的。

3 试验结果与讨论

3.1 TiAl-Cr 合金的制备研究

李军等^[7]在电铝热还原法制备 TiAl 合金的研

表 1 铝热还原金属氧化物的主要的化学反应式

Table 1 Major chemical formulae for the thermal reduction of metal oxides by aluminum

反应式	编号
$\text{Al} + 3/4\text{TiO}_2 = 3/4\text{Ti} + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	(1)
$\text{Al} + 3\text{TiO}_2 = 3/2\text{Ti}_2\text{O}_3 + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	(2)
$\text{Al} + 3/2\text{TiO}_2 = 3/2\text{TiO} + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	(3)
$\text{Al} + 3/2\text{TiO} = 3/2\text{Ti} + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	(4)
$2\text{Al} + \text{CrO}_3 = \text{Cr} + \text{Al}_2\text{O}_3$	(5)
$\text{Al} + 1/2\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{Fe} + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	(6)
$\text{Al} + 3/2\text{TiO} = 3/2\text{Ti} + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	(7)
$5\text{Al} + 3\text{TiO} = 3\text{TiAl} + \text{Al}_2\text{O}_3$	(8)
$11\text{Al} + 3\text{TiO} = 3\text{TiAl}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$	(9)

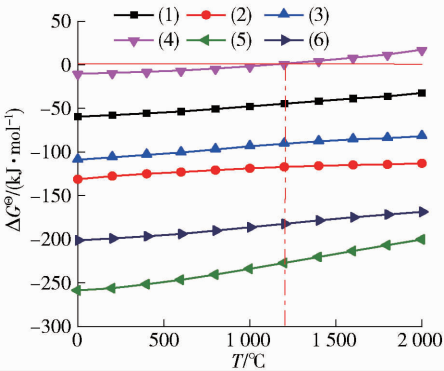


图 2 铝热还原过程化学反应式 $\Delta G^\theta - T$ 图

Fig. 2 Chemical reaction equation $\Delta G^\theta - T$ diagram aluminum thermal reduction process for

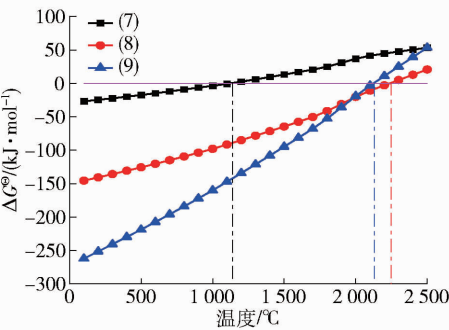


图 3 TiO 与不同配铝量反应的 $\Delta G^\theta - T$ 图

Fig. 3 $\Delta G^\theta - T$ plots for the reaction of TiO with different aluminum

究工作中得出的较适宜工艺参数为还原温度 1 550 ℃、配铝量(质量比) Al/TiO₂ = 0.9、还原时间 30 min、CaO: Al₂O₃: CaF₂ = 40%: 40%: 20%, 原料配

比见表 2, 试验结果见图 4。从宏观图中可以看出渣-金分离界面清晰, 渣中不夹杂合金颗粒, 渣-金分离效果好。

表 2 制备 TiAl-Cr 合金原料配比

Table 2 Ratio of raw materials for the preparation of TiAl-Cr alloys

试验编号	Al/TiO ₂ (质量比)	钛白粉/g	铝粉/g	CrO ₃ /g	CaO/g	CaF ₂ /g
No. 1	0.9	150	135	15	143	71.5
No. 2	0.9	150	135	30	158.3	79.15

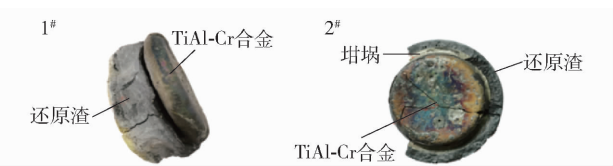


图 4 试验结果宏观图

Fig. 4 Macro graph of experimental results

表 3 为不同 CrO₃ 配入量条件下还原渣的 XRF 分析, 从表中可以看出 No. 1 和 No. 2 还原渣中都没有检测出 CrO₃, 说明原料中的 CrO₃ 几乎被 Al 完全还原进入合金。No. 1 还原渣中含有 1.49% TiO₂, No. 2 还原渣中含有 5.8% TiO₂, 相同配铝量条件下, 随着 CrO₃ 配入量的增加, 还原渣中 TiO₂ 含量稍微增加, 从热力学分析来看, CrO₃ 优先于 TiO₂ 还原, 随着 CrO₃ 配入量增加, 消耗了更多的还原剂 Al, 而随着 Al 含量降低, TiO₂ 部分还原生成的 TiO 难以被完全还原而进入熔渣中, 造成 Ti 收率降低。因此, 随着 CrO₃ 配入量的增加, 应相应增加配铝量, 提升钛的收率。

表 3 TiAl-Cr 还原渣 XRF 分析(质量分数)

Table 3 XRF analysis of TiAl-Cr reduced slag (mass percent)

试验编号	Al ₂ O ₃	CaO	F	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
No. 1	46.6	42.8	8.37	1.49	0.391	0.138
No. 2	44.1	37.3	10.0	5.8	0.539	0.215

由于钛铝基合金密度低, 渣-金分离困难, 良好的渣系是本工艺成功的关键。图 5 为不同 CrO₃ 配入量下还原渣的 XRD 分析, 渣系物相主要是 Ca₁₂Al₁₄O₃₂F₂、CaAl₄O₇和 CaF₂。采用 Factsage 热力学软件中“Phase Diagram”模块绘制了 Al₂O₃-CaO-CaF₂

三元渣系液相线图,见图 6,从图可看出,该渣系较大成分范围内的熔化温度为 1 300 ~ 1 500 ℃。当焙烧温度控制在 1 550 ℃ 时,在较大成分范围内的渣系都是液态渣系。

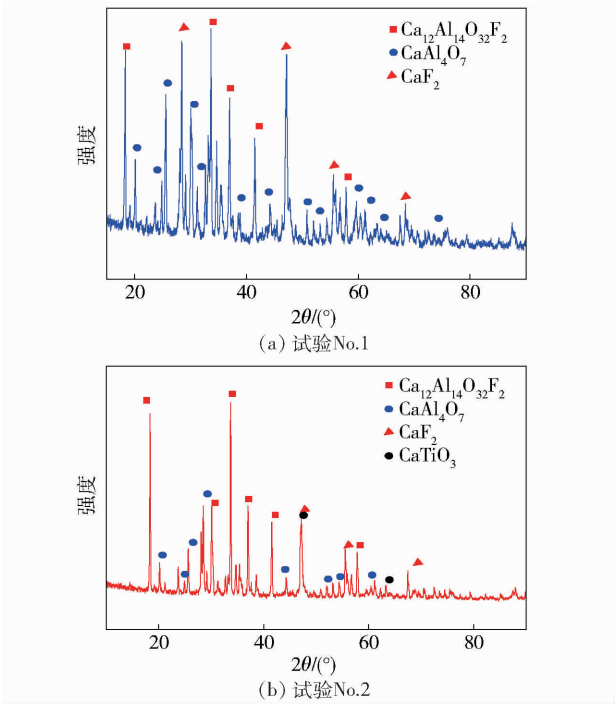


图 5 还原渣 XRD 分析

Fig. 5 XRD analysis of reduced slag

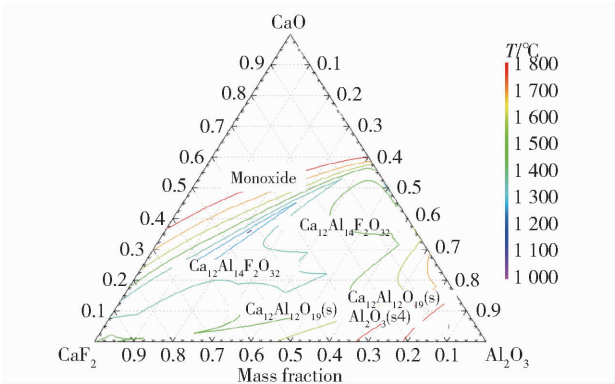


图 6 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--CaF}_2$ 三元渣系液相线图

Fig. 6 Liquid phase line diagram of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--CaF}_2$ ternary slag system

对制备的 TiAl–Cr 合金进行 XRF 分析,见表 4。从表中可以看出,随着原料中 CrO_3 配入量增加,合金中 Cr 增加,同时还还原过程中消耗了更多的 Al,使进入合金的 Al 含量降低。试验结果表明合金中 Cr 含量可以通过改变 CrO_3 配入量进行调整。

表 4 TiAl–Cr 合金 XRF 分析(质量分数)

Table 4 XRF analysis of TiAl–Cr alloys (mass percent)

试验编号	Ti	Al	Cr	Ca	Si	Fe	合金质量/%
No. 1	60.0	31.3	5.6	3.33	0.862	0.43	138.6g
No. 2	62.7	22.6	11.54	1.42	0.215	0.681	130g

根据合金质量和合金成分,计算合金、Ti、Cr 的收率,见图 7。从图中可以看出, No. 1、No. 2 试验中 Cr 收率分别达到 99.5%、96.2%,说明 CrO_3 被 Al 几乎完全还原进入合金中。在相同配铝条件下,随着 CrO_3 加入量的增加,消耗了更多的还原剂 Al,进入合金中 Al 含量明显降低。而随着 Al 含量降低, TiO_2 部分还原生成的 TiO 难以被完全还原而进入熔渣中,使得熔渣黏度升高,造成合金收率和 Ti 收率降低。

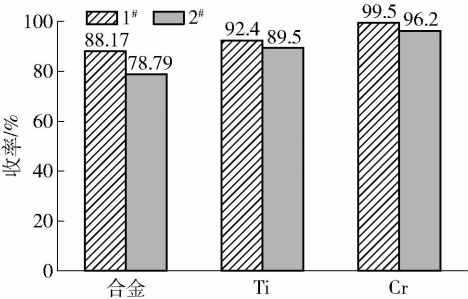


图 7 合金、Ti、Cr 的收率

Fig. 7 Yield of alloy、Ti、Cr

对不同 CrO_3 配入量下制备的 TiAl–Cr 合金进行 XRD 分析,结果见图 8。No. 1 试验条件下, TiAl–Cr 合金的主要物相为 Ti_3Al 和 Al_8Cr_5 ;随着原料中 CrO_3 加入量的增加(No. 2 试验),进入合金中的 Cr 含量增加, Al_8Cr_5 相的峰明显增强。

3.2 TiAl–Fe 合金的制备研究

在还原温度 1 550 ℃、配铝量 $\text{Al}/\text{TiO}_2 = 0.9$ 、 $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{CaF}_2 = 40\%:40\%:20\%$ 、还原时间 30 min 的条件下,考察不同 Fe_2O_3 配入量对 TiAl–Fe 合金制备的影响,原料配比见表 5,试验结果见图 9。从图中可以看出, No. 3 试验配比条件下,渣–金分离困难,熔渣黏度大,部分合金夹杂在熔渣中;随着 Fe_2O_3 配入量增加(No. 4 试验),渣–金分离效果明显好转,渣–金界面相对清晰,分离效果相对较好。制备的 TiAl–Fe 合金表面光泽且形成整块状,脆性较大。

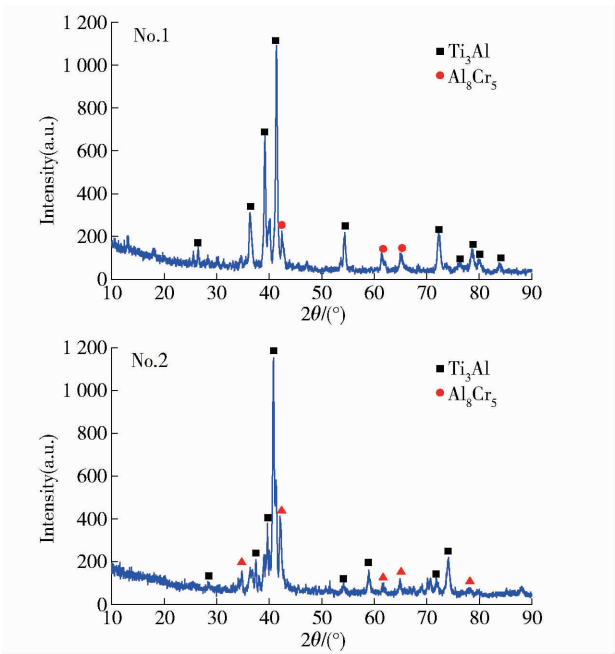


图 8 制备的 TiAl–Cr 合金 XRD 分析

Fig.8 XRD analysis of prepared TiAl–Cr alloy

表 5 制备 TiAl–Fe 合金原料配比

Table 5 Ratio of raw materials for the preparation of TiAl–Fe alloys

试验 编号	Al/TiO ₂ (质量比)	钛白粉/ g	铝粉/ g	Fe ₂ O ₃ / g	CaO/ g	CaF ₂ / g
No. 3	0.9	150	135	10	134.3	78.3
No. 4	0.9	150	135	15	137.4	68.7



图 9 试验结果宏观图

Fig.9 Macro graph of experimental results

对还原渣进行 XRF 分析,结果见表 6。还原渣中 Fe₂O₃ 含量仅有 0.511% 和 0.380%,说明 Fe₂O₃ 基本被还原进入合金中;还原渣中还有少量的 TiO₂ 未被还原。

对还原渣进行 XRD 分析,结果见图 10。从图中可以看出,No. 3 还原渣主要物相为 CaF₂、Ca₁₂Al₁₄O₃₂F₂、CaAl₄O₇ 和 Ca₅Al₆O₁₄,No. 4 还原渣中主要物相为 CaF₂、Ca₁₂Al₁₄O₃₂F₂、CaAl₄O₇。No. 3 渣中出现

表 6 还原渣 XRF 分析(质量分数)

Table 6 XRF analysis of reduced slag (mass percent)

试验编号	Al ₂ O ₃	CaO	F	TiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
No. 3	44.9	39.8	8.18	4.6	1.39	0.511	0.275
No. 4	46.8	37.5	10.3	2.89	1.54	0.380	0.131

高熔点的 Ca₅Al₆O₁₄,导致熔渣黏度升高,造成渣金分离困难。随着 Fe₂O₃ 配入量增加(No.4 试验),进入合金的 Fe 元素增加,合金密度增大,有利于渣金分离。

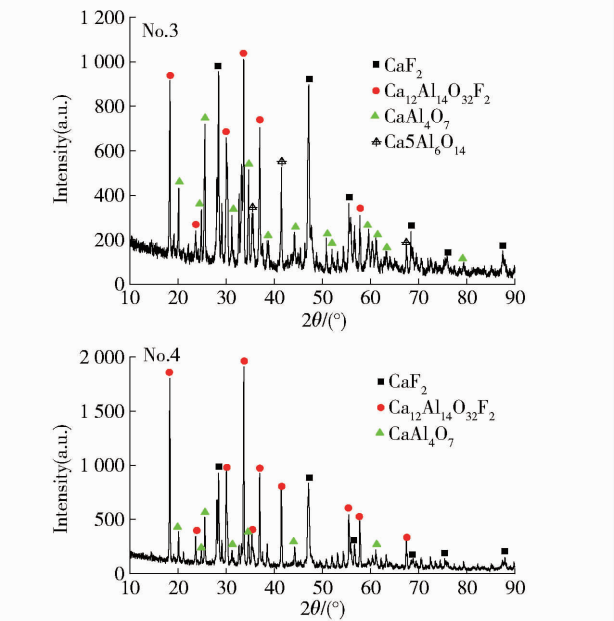


图 10 还原渣 XRD 分析

Fig.10 XRD analysis of reduction slag

对所制备的 TiAl–Fe 合金进行 XRF 分析,结果见表 7。从表中可以看出,随着 Fe₂O₃ 配入量的增加,合金中 Fe 含量也相应增加,Ti 含量降低。

表 7 制备的 TiAl–Fe 合金 XRF 分析(质量分数)

Table 7 XRF analysis of prepared TiAl–Fe alloys (mass percent)

试验编号	Ti	Al	Fe	Ca	Si	合金质量
No. 3	63.8	25.9	4.8	3.06	1.9	106.4g
No. 4	57.9	30	6.05	3.10	1.7	110g

对所制备的 TiAl–Fe 合金进行 XRD 分析,结果见图 11,从图中可以看出,TiAl–Fe 合金主要物相为 Ti₃Al 和 Al₆Fe。

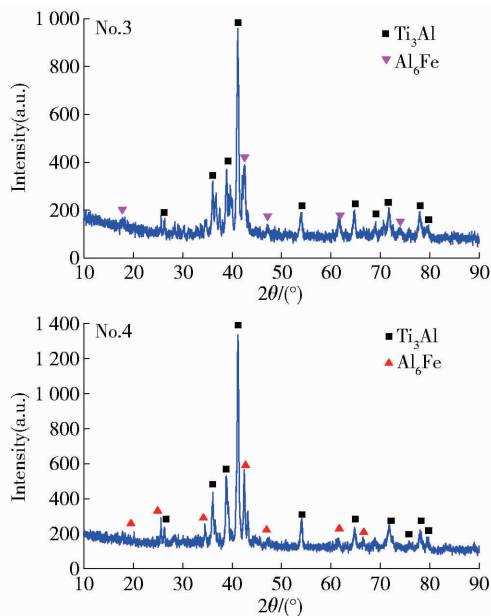


图 11 制备的 TiAl-Fe 合金的 XRD 分析

Fig. 11 XRD analysis of the prepared TiAl-Fe alloy

根据合金成分及合金质量,计算合金、Ti、Fe 的收率,结果见图 12。从图中可以看出,由于渣-金分离不彻底,造成了合金、Ti、Fe 的收率偏低。

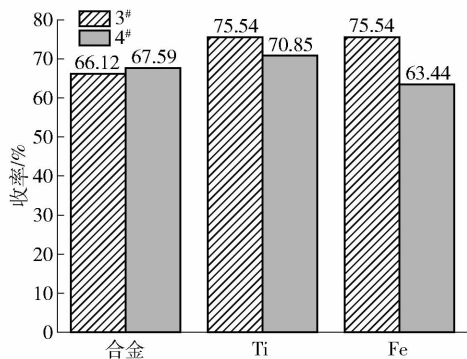


图 12 合金、Ti、Cr 的收率

Fig. 12 Yield of Alloy, Ti, Cr

4 结论

针对采用海绵钛制备 TiAl 基合金成本高的问题,本文系统探索了以钛的氧化物和合金化元素 (Cr、Fe) 氧化物为原料,铝热还原法一步合成 TiAl-M (Fe, Cr) 三元钛铝基合金可行性,并对试验条件下制备的合金及渣产物进行了表征和成分分析,计算了合金及金属收率,得到以下主要结论。

1) 通过热力学计算及试验研究表明,以 TiO_2 和合金化元素氧化物 M_xO_y (CrO_3 和 Fe_2O_3) 为原料,可以通过铝热还原一步合成 TiAl-Cr、TiAl-Fe 等三元合金。

2) 在还原温度 1550 °C、配铝量 $\text{Al}/\text{TiO}_2 = 0.9$ 、还原时间 30 min、 $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{CaF}_2 = 40\%:40\%:20\%$ 的条件下,制备的 TiAl-Cr 合金与熔渣分离效果较好,合金收率最高可以达到 88%,Ti 收率达到 92.4%,Cr 收率达到 99.5%。合金中 Cr 含量可以根据原料配比进行调控;TiAl-Cr 合金主要物相为 Ti_3Al 和 Al_8Cr_5 ,随着原料中 CrO_3 加入量的增加,进入合金中的 Cr 含量增加, Al_8Cr_5 相的峰明显增强。

3) 在还原温度 1550 °C、配铝量 $\text{Al}/\text{TiO}_2 = 0.9$ 、还原时间 30 min、 $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{CaF}_2 = 40\%:40\%:20\%$ 的条件下,制备的 TiAl-Fe 合金与熔渣分离不彻底,有合金颗粒夹杂在熔渣中,合金收率仅为 67.59%,Ti 收率为 75.51%,Fe 收率 75.54%;TiAl-Fe 合金主要物相为 Ti_3Al 和 Al_6Fe 。

[参考文献]

- [1] POLLOCK T M. Alloy design for aircraft engines [J]. Nature Materials, 2016, 15(8): 809-815.
- [2] YANG L, CHAI L H, LIANG Y F, et al. Numerical simulation and experimental verification of gravity and centrifugal investment casting low pressure turbine blades for high Nb-TiAl alloy [J]. Intermetallics, 2015, 66: 149-155.
- [3] WANG Shouren, GUO Peiquan, YANG Liying. Centrifugal precision cast TiAl turbocharger wheel using ceramic mold [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 204(1): 492-497.
- [4] 莫畏, 邓国珠, 罗方承. 钛冶金 [M]. 第二版. 北京: 冶金工业出版社, 1998: 36-56.
MO Wei, DENG Guozhu, LUO Fangcheng. Titanium metallurgy [M]. Second Edition. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998: 36-56.
- [5] CHEN G Z, FRAY D J, FARTHING T W. Direct electrochemical reduction of titanium dioxide to titanium in molten calcium chloride [J]. Nature, 2000, 407: 361-363.
- [6] 邹星礼, 鲁雄刚. 攀枝花含钛高炉渣直接制备钛合金 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(9): 1829-1835.
ZOU Xingli, LU Xiong gang. Direct preparation of titanium alloy from Panzhihua titanium-containing blast furnace slag [J]. China Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(9): 1829-1835.
- [7] 李军, 鲁雄刚, 杨绍利, 等. 电铝热还原法制备 TiAl 合金理论及试验研究 [J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(5): 46-52.
LI Jun, LU Xiong gang, YANG Shaoli, et al. Theoretical and experimental study on the preparation of TiAl alloy by electro-

aluminum thermal reduction method[J]. Iron and Steel Vanadium and Titanium, 2017, 38(5): 46–52.

[8] 李军, 吴恩辉, 杨绍利, 等. 电铝热还原法制备的钛铝合金真空磁悬浮精炼研究[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(2): 41–48.

LI Jun, WU Enhui, YANG Shaoli, et al. Study on vacuum magnetic levitation refining of titanium-aluminum alloys prepared by electro-aluminum thermal reduction method[J]. Iron and Steel Vanadium and Titanium, 2019, 40(2): 41–48.

[9] KIMURA M, HASHIMOTO K, MORIKAWA H. Study on phase stability in Ti–Al–X systems at high temperatures [C]// Proceedings of the Second International ASM Conference on High Temperature Aluminides and Intermetallics, San Diego, CA, USA, 1992: 54–59.

[10] 席艳君. 合金元素对 TiAl 合金高温氧化行为的影响[J]. 中原工学院学报, 2006, 17(1): 35–37.

XI Yanjun. Influence of alloying elements on the high temperature oxidation behavior of TiAl alloys [J]. Journal of Zhongyuan Institute of Technology, 2006, 17(1): 35–37.

[11] 张澜庭, 毛大立, 吴建生. 金属间化合物在工业中的应用[J]. 上海金属, 1999(2): 11–14.

ZHANG Lanting, MAO Dali, WU Jiansheng. Application of intermetallic compounds in industry[J]. Shanghai Metals, 1999 (2): 11–14.

Preparation of TiAl–M (M = Cr, Fe) alloy based on aluminum thermal reduction method

LI Jun^{1,2,3,4}, PENG Wenjing^{1,2}, LI Xiang^{1,2}, WU Enhui^{1,2,3,4}, MA Lan^{1,2}, YANG Shaoli^{1,2},
HOU Jing^{1,2}, XU Zhong^{1,2}, LI Hong^{1,2}, YANG Shangui^{1,2}

- (1. College of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China;
2. Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization Key Laboratory of Sichuan Province,
Panzhihua 617000, China;
3. State Key Testing Laboratory of Vanadium & Titanium, Panzhihua 617000, China;
4. Sichuan Provincial Engineering Laboratory of Solar Technology Integration, Panzhihua 617000, China)

Abstract: TiAl-based alloys have excellent properties. However, due to the high price of titanium sponge, the preparation cost of TiAl-based alloys is high, which limits the application of TiAl-based alloys. In this paper, TiAl–M (Cr, Fe) alloy was prepared by one-step synthesis using TiO₂, Fe₂O₃, CrO₃ as raw materials and Al as reducing agent by aluminum thermal reduction method. The experimental results show that TiAl–Cr alloy can be separated from the reduced slag with good effect under the conditions of roasting temperature of 1 550 ℃, Al/TiO₂ = 0.9, slag ratio of CaO: Al₂O₃: CaF₂ = 40%: 40%: 20% and roasting time of 30 min. The Cr element in the alloy can be regulated according to the amount of CrO₃ in the raw material. The alloy yield can reach up to 88%, Ti yield up to 92.4% and Cr yield up to 99.5%. The main phases of TiAl–Cr alloy are Ti₃Al and Al₈Cr₃. TiAl–Fe alloy is brittle, and the main phases of TiAl–Fe alloy are Ti₃Al and Al₆Fe.

Key words: TiAl-based alloy; titanium dioxide; aluminothermic reduction; one-step synthesis; TiAl–Cr alloy; TiAl–Fe alloy