



BaZrO₃ 耐火材料与 TiAl 合金熔体的界面反应

贺 进¹, 魏 超¹, 李明阳¹, 汪宏斌^{1,2}, 鲁雄刚^{1,2}, 李重河^{1,2}

- (1. 上海大学 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200072;
2. 上海特种铸造工程技术研究中心, 上海 201605)

摘 要: 以自合成的 BaZrO₃ 粉体为材料制备成坩埚, 在真空条件下熔炼了 TiAl 合金, 并对熔炼后合金的显微组织及合金与 BaZrO₃ 耐火材料的界面反应情况进行研究。结果表明: 熔炼后合金的显微组织由大量不同取向的片层状 $\alpha_2+\gamma$ 和少量条块状的 γ 相组成; 合金熔体对 BaZrO₃ 耐火材料的润湿性较差, 熔炼后未观察到界面反应层的存在; BaZrO₃ 对合金熔体具有良好的化学惰性, 是极具潜力的 TiAl 合金熔炼用耐火材料。

关键词: BaZrO₃; TiAl; 合金熔炼; 界面反应

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Interface reaction between BaZrO₃ refractory and melted TiAl alloys

HE Jin¹, WEI Chao¹, LI Ming-yang¹, WANG Hong-bin^{1,2}, LU Xiong-gang^{1,2}, LI Chong-he^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. Shanghai Special Casting Engineering Technology Research Center, Shanghai 201605, China)

Abstract: A homemade BaZrO₃ crucible was used to melt TiAl alloys, the microstructure of the melt TiAl alloys and interface reaction between the BaZrO₃ refractory and TiAl melt were investigated. The results demonstrate that the microstructure of TiAl alloys is largely composed of lamellar $\alpha_2+\gamma$ with different orientations and small amount of bulk γ phase; the melts exhibit poor wettability with BaZrO₃ refractory and no reaction layer is observed between them. This may imply that the BaZrO₃ is a promising candidate of materials for the melting of TiAl alloys.

Key words: BaZrO₃; TiAl; alloy melting; interface reaction

TiAl 金属间化合物具有高比强度、高弹性模量、优良的抗蠕变、抗氧化、耐高温和阻燃性能, 密度不到镍基合金的 50%, 被认为是 850~1000 °C 范围内最值得关注的轻质高温结构材料^[1]。但 TiAl 合金熔体具有较高的化学活性, 高温下会与普通的耐火材料发生不同程度的化学反应, 这给合金的熔炼带来很大的困难。目前, 冶炼 TiAl 合金的方法主要如下^[2-4]: 真空自耗电弧熔炼(Vacuum arc melting)、感应凝壳熔炼(Induction skull melting)、电子束熔炼(Electron beam

melting)、等离子束熔炼(Plasma melting)、和真空感应熔炼(Vacuum induction melting)。

真空自耗电弧熔炼在熔炼时会形成不均匀的温度场, 容易引起化学成分不均匀, 从而造成成分偏析和组织缺陷; 通过改进线圈和分瓣坩埚形状, 凝壳感应熔炼可以实现活泼金属熔体电磁学意义上的悬浮熔炼, 避免坩埚材料对熔体污染, 但由于坩埚底部为整体结构, 不会形成排斥熔体的洛伦兹力, 熔体在底部与坩埚接触损失大量热量, 浇注完成后会在坩埚内形

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51225401, 51374142); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2014CB643403)

收稿日期: 2014-11-17; **修订日期:** 2015-03-02

通信作者: 李重河, 教授, 博士; 电话: 021-56332934; E-mail: chli@staff.shu.edu.cn

成较厚的凝壳^[5]；电子束熔炼要在高真空下工作，真空度为 1×10^{-2} Pa，这种高真空下 Al 元素的挥发对合金成分会产生极大的影响，难以控制凝固后的组织^[6]；等离子束熔炼是比较理想的 TiAl 合金熔炼方法，但熔炼成本也是最昂贵的^[7]。

真空感应熔炼是高温合金冶炼最常用的方法，其较强的电磁搅拌作用能使合金熔体保持较高的过热度，有利于消除成分偏析，从而保证合金成分和组织的均匀性；且它没有强制水冷系统，能耗较低，可以降低合金的熔炼成本。但由于 TiAl 合金高的化学活性，普通的耐火材料难以胜任。为了寻求一种可以适合感应熔炼 TiAl 合金的耐火材料，国内外学者对 MgO ^[8]、 Al_2O_3 ^[8-9]、 CaO ^[8,10]、 Y_2O_3 ^[8,11]等氧化物材料为研究对象进行了大量的研究工作。从现有的数据比较来看， Y_2O_3 是比较理想的耐火材料，但由于 Y_2O_3 的抗热震性较差且钇是稀土元素价格昂贵，不适宜作为大规模的工业化生产和应用。从热力学角度考虑，氧化物的标准生成自由能值越低越稳定，自由能值小于 TiO_2 的材料都可以考虑作为熔炼钛合金的候选材料。图 1 所示为几种氧化物与 TiO_2 标准生成自由能随温度的变化关系。从图 1 可以看出，除了常用的氧化物外，锆酸盐类物质(CaZrO_3 、 SrZrO_3 、 BaZrO_3)也具有有良好的潜力。

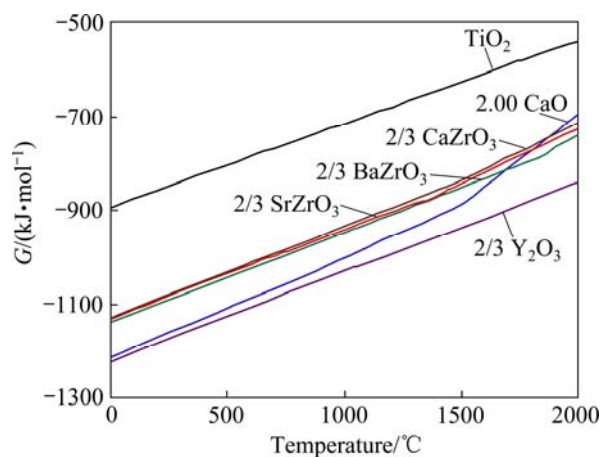


图 1 几种氧化物标准生成自由能随温度的变化

Fig. 1 Variation of standard formation free energies with temperature for some relative oxides

锆酸盐(CaZrO_3 、 SrZrO_3 和 BaZrO_3 的熔点分别达到 2300、2600 和 2700 °C)属于立方钙钛矿结构，具有较高的化学稳定性。在本文作者的前期工作中，以这 3 种材质为耐火材料制备成坩埚感应熔炼了 TiNi ^[12-15]、 TiFe ^[16] 合金。研究表明，相比 CaZrO_3 和 SrZrO_3 ， BaZrO_3 对钛合金熔体具有更高的化学稳

定性，且在前期研究工作中， BaZrO_3 已被制备成陶瓷型壳成功应用于钛合金的精密铸造^[17]。因此，本文作者以 BaZrO_3 为耐火材料制备成的坩埚在 1550 °C 氩气氛围保护下熔炼了 TiAl 合金，对熔炼后合金的组织及熔体与 BaZrO_3 耐火材料间的界面反应情况进行了研究。

1 实验

1.1 坩埚制备

以工业级的 BaCO_3 (纯度 > 99%) 和 ZrO_2 (纯度 > 99.2%) 为原材料，以摩尔比接近 1:1 配比，采用固相合成法在 1200 °C 保温 4 h 条件下合成 BaZrO_3 粉体。合成粉体经 800 °C 预烧 4 h，冷却后掺入 2% (质量分数) 的助溶剂 TiO_2 并采用球磨机混合均匀；用等静压成型技术将混合后的粉体压制成坩埚胚体，胚体在 900 °C 保温 4 h 得到素胚；素坯经 1450 °C 保温 3 h 后升温至 1750 °C，并在 1750 °C 保温 3 h；然后随炉冷却至室温，得到成品坩埚，外径 36 mm、内径 30 mm、高 35 mm。

1.2 熔炼实验

实验用合金的名义成分为 Ti-48Al (摩尔分数，%) 其主要化学成分如表 1 所列，样品尺寸为直径 d 20 mm × 40 mm 的圆试样，去除表面氧化皮，用丙酮进行超声清洗，并在 200 °C 烘干 2 h。熔炼试验装置为 WZG-2 型真空感应烧结炉，采用 Marathon 系双色红外测温仪进行控温。具体过程如下：将约 45 g 的 TiAl 合金棒放置于自制 BaZrO_3 坩埚中，为了降低气氛中的氧含量，熔炼前抽真空至 1×10^{-2} Pa；控制调节功率，经 4 h 从室温升温至 1400 °C，在 1400 °C 充入高纯氩气至 0.06 MPa，然后以 5~10 °C/min 快速升温至 1550 °C，保温 30 min 后随炉冷却至室温。

冷却后将合金锭沿径向切开，样品经粗磨、细磨、抛光、抛光后经腐蚀液 (90% H_2O + 5% HNO_3 + 5% HF (体积分数)) 腐蚀过程金相试样。利用金相显微镜对试样的显微组织进行观察；用 D/Max-2200 型 X 射线衍射仪进行物相分析；用 JSM-6700F 型和 S-570 型扫描

表 1 实验用 TiAl 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental TiAl alloys (mass fraction, %)

Al	Fe	O	N	Others	Ti
32.93	0.072	0.0473	0.0087	<0.01	Bal.

电子显微镜进行界面反应层的形貌分析;用 EDS 能谱、IRIS Advantage ICP-AES 型电感耦合等离子体(ICP)原子发射光谱分析仪对不同熔炼批次 TiAl 合金中 Ba 元素含量进行分析,取其平均值。

2 结果与分析

2.1 显微组织分析

TiAl 合金有 4 种典型的显微组织,即等轴近 γ 组织(NG)、双态组织(DP)、近片层组织(NL)和全片层组织(FL)^[18]。合金的力学性能受显微组织的影响很大,其中 NL 和 FL 组织能获得强度和韧性的良好配合,使合金具备优异的综合力学性能,在工程应用中多倾向获得片层组织。图 2 所示为熔炼后 TiAl 合金的显微组织,铸态晶粒尺寸较粗大(见图 2(a)),枝晶组织中由大量不同取向的片层状 $\alpha_2+\gamma$ 和少量条块状的 γ 相组成(见图 2(b))。这与 GOMES 等^[10]、IMAYEV 等^[19]的研究结果相同,是 TiAl 合金中 Al 含量低于 49%(摩尔分数)时的典型显微组织。图 3 所示为熔炼后合金的 XRD 谱。从图 3 中可以看出,合金基体由 γ (TiAl)相和 α_2 (Ti₃Al)相组成,未观察到夹杂相的存在。

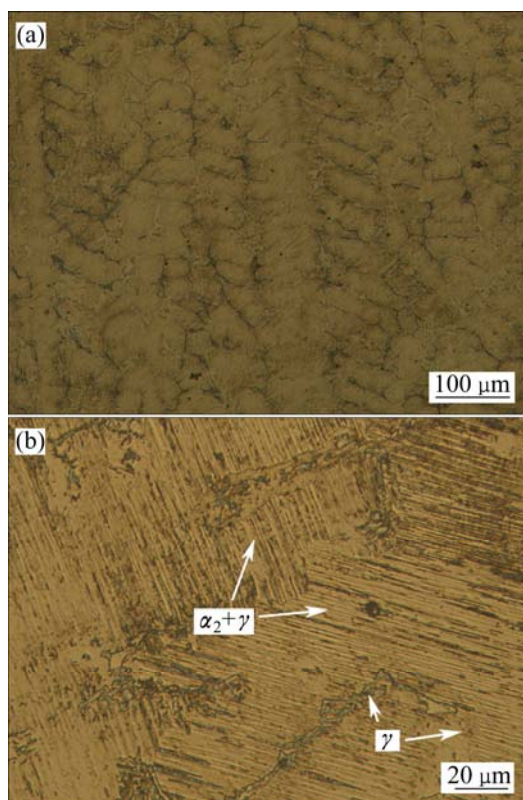


图 2 熔炼后 TiAl 合金的显微组织

Fig. 2 Microstructures of melted TiAl alloys

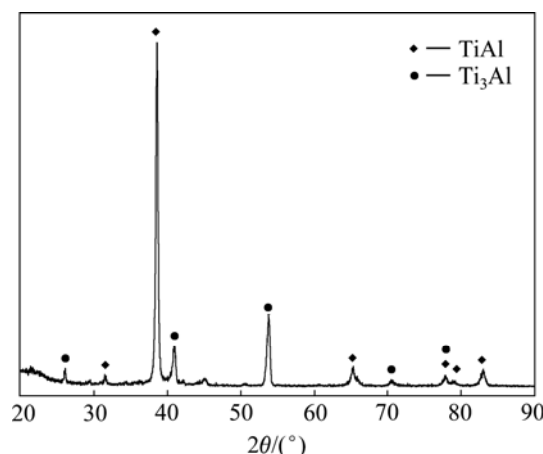


图 3 熔炼后 TiAl 合金的 XRD 谱

Fig. 3 XRD pattern of melted TiAl alloys

2.2 界面分析

图 4 所示为 KUANG 等^[8]在与本实验条件相似的情况下用 MgO(a)、CaO(b)、Al₂O₃(c)、Y₂O₃/MgO(d) 坩埚熔炼 TiAl 合金后合金与坩埚的宏观形貌。为观察 BaZrO₃ 坩埚与 TiAl 合金的界面反应情况,熔炼后用酚醛树脂将坩埚和合金整体镶嵌,沿纵向用水冷金刚石切盘将合金切开。在切割时合金与坩埚发生分离,分离后坩埚整体保持完整,合金表面光滑,未观察到反应层(见图 4(e))。从图 4 可以看出,用 MgO 坩埚熔炼 TiAl 合金时熔体向坩埚侧渗透,形成了一定厚度的渗透层;采用 CaO 坩埚熔炼时合金熔体已渗透出坩埚其原因可能是由于坩埚的致密性不足,而 GOMES 等^[10]用 CaO 坩埚感应熔炼 TiAl 合金时,坩埚对合金显示出良好的相容性,熔炼后界面反应层厚度仅为 5 μm;实验用 BaZrO₃ 坩埚同 Al₂O₃ 和 Y₂O₃/MgO 坩埚相同,熔炼后未发现界面反应层的存在(见图 4(c)、(d)和(e))。耐火材料与合金熔体间的润湿性差可以减小界面反应程度,是其可以应用于熔炼合金的必要条件^[20]。但罗文忠等^[21]和 ZHANG 等^[22]用 Al₂O₃ 坩埚研究了定向凝固过程中 Al₂O₃ 与 TiAl 合金熔体的界面反应情况,结果表明,Al₂O₃ 会与合金熔体发生反应形成反应层,较在合金基体中发现大量的 Al₂O₃ 夹杂。

图 5(a)所示为熔炼后合金的 SEM 像。由图 5(a)可以看出,合金与坩埚分离后在局部区域形成了厚度不均匀的“附着层”,但合金与“附着层”的界面清晰。EDS 结果表明该区域主要成分为 Ba、Zr 和少量的 Al,未发现 Ti 元素的存在(点 A)。在界面处 Ba 和 Zr 元素的含量偏高(点 B),靠近合金侧(点 C、D)坩埚元素含量明显降低。

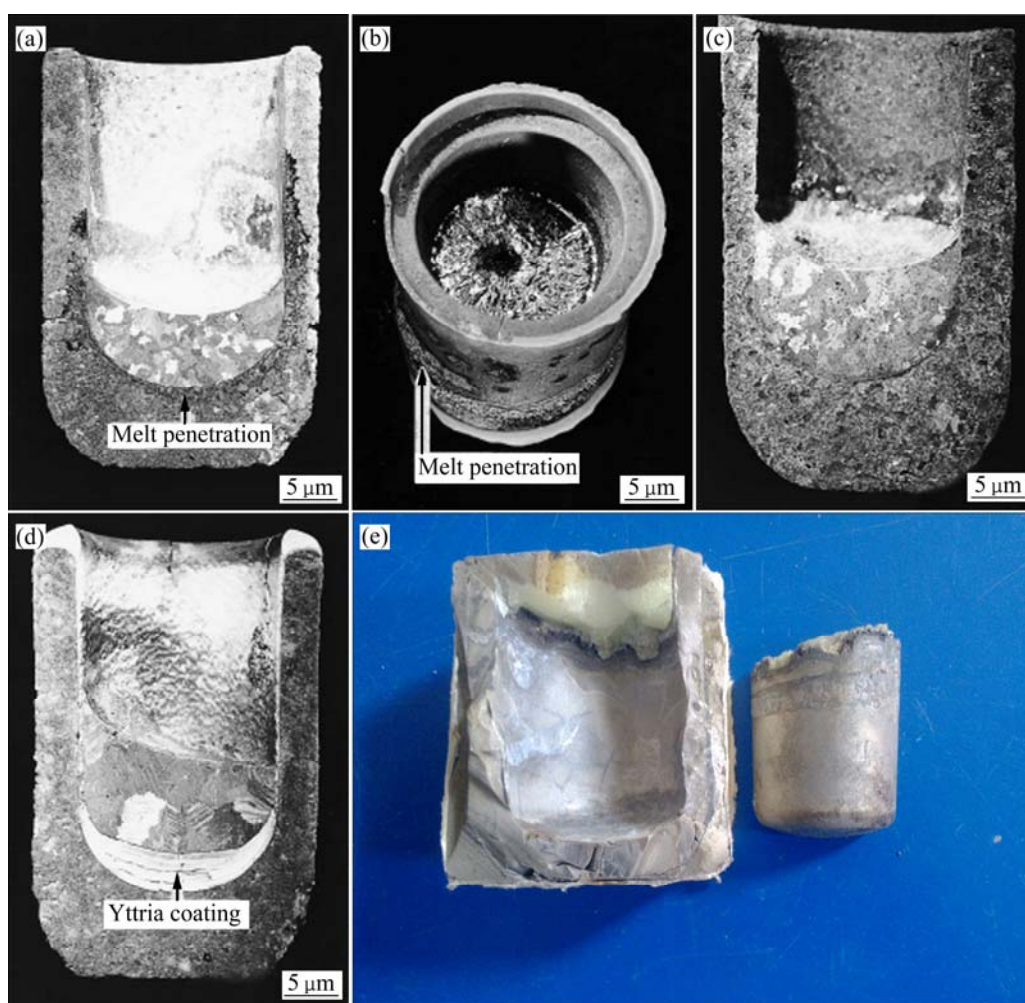


图 4 常用氧化物坩埚熔炼后 TiAl 合金的宏观形貌

Fig. 4 Macro photographs of melted TiAl alloys with ordinary oxides ceramic: (a) MgO; (b) CaO; (c) Al₂O₃; (d) Y₂O₃ coated MgO^[8]; (e) BaZrO₃

图 5(b)所示为沿试样外表面至合金侧 Ti、Ba、Zr、Al 元素的 EDS 线扫描结果, 其中左侧为酚醛树脂, 右侧为合金基体。从线扫描结果可以看出, 在坩埚与合金的界面处 Zr 元素有明显的陡降趋势, 但 Ba 元素不明显。进一步用 EDS 和 ICP 对不同熔炼批次的合金中 Ba 元素含量进行测定, 结果表明, 只有在坩埚和合金的界面处发现有少量的 Ba 元素(见表 2 中区域 B、C、D), 在合金基体未发现 Ba 元素的存在; ICP 检测结果表明, 基体中 Ba 元素的平均含量仅为 3×10^{-5} (见表 3)。

从热力学角度考虑, 高温下 BaZrO₃ 比钛的氧化物具有更高的稳定性, 合金熔体与坩埚材料之间无化学反应发生。但在制备坩埚过程中很难使坩埚的致密度达到 100%, 坩埚存在一定的孔隙率。表 4 所列不同制备工艺下 BaZrO₃ 坩埚的密度。从表 4 可以看出, 当向 BaZrO₃ 粉体中添加 2%(质量分数)TiO₂ 作为助溶

剂并在 1750 °C 下烧结时, 可获得坩埚的致密度为 6.0544 g/cm³, 为高理论密度的 97.0%。熔炼时由于毛细管作用熔体会沿着孔隙向坩埚中渗透; 电磁搅拌也会将坩埚材料冲刷进合金熔体。因此, 熔炼后会在坩埚与熔体的界面处形成附着层, 在靠近合金侧发现少量坩埚元素。

2.3 合金中的氧含量

由于 TiAl 合金在高温下与间隙元素氧的结合能力很强, 感应熔炼会不可避免地造成耐火材料对合金熔体的污染, 使得熔炼后合金中的氧含量升高。表 5 所列为与本实验在相似条件下使用不同耐火材料熔炼合金后合金中的氧含量。从表 5 可以看出, 用 MgO、Al₂O₃ 坩埚熔炼时, 合金中的氧含量高达 1×10^{-2} ; 而与稳定性较好的 CaO、Y₂O₃ 坩埚相比, 用 BaZrO₃ 坩埚熔炼后合金中的氧含量为 1.653×10^{-3} 。

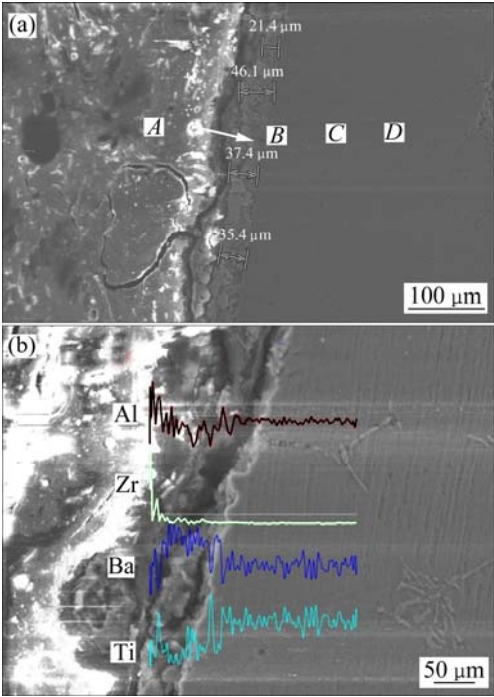


图 5 熔炼后 TiAl 合金界面处 EDS 分析结果
Fig. 5 EDS test results of melted TiAl alloy: (a) Dot analysis; (b) Line scan

表 2 熔炼后 TiAl 合金界面处(图 5(a))及基体中(图 6(b))的 EDS 分析结果

Table 2 EDS analysis results of surface and matrix of melted TiAl alloy shown in Fig. 5(a) and Fig. 6(b)

Zone	Mole fraction/%			
	Al	Zr	Ba	Ti
A	19.65	14.88	65.47	0
B	31.91	2.36	14.08	51.65
C	38.45	0.27	—	61.27
D	40.63	0.45	—	58.92
E	64.40	—	—	35.60
F	—	2.79	17.20	79.95

表 3 不同熔炼批次 TiAl 合金中 Ba 元素含量的 ICP 检测结果

Sample No.	w(Ba)/10 ⁻⁶
1	11
2	63
3	16
Average	30

表 4 不同工艺条件下 BaZrO₃ 陶瓷的密度

Table 4 Density of BaZrO₃ crucibles under different experimental conditions.

Sample No.	Sintering temperature/℃	Material	Density/(g·cm ⁻³)	Density in theory/%
0	—	BaZrO ₃	5.5237	88.6
a	1650	BaZrO ₃	5.8642	93.4
b	1650	BaZrO ₃ +2%TiO ₂	6.0302	96.5
c	1750	BaZrO ₃	5.8917	94.3
d	1750	BaZrO ₃ +2%TiO ₂	6.0544	97.0

目前, Y₂O₃ 是钛合金熔炼和精密铸造用最稳定的耐火材料, 但 Y₂O₃ 这种材质的抗热震性能很差。将其制备成多孔结构, 或涂覆涂层能有效提高材料的抗热震性, 但也不能完全避免合金中 Y₂O₃ 的夹杂^[23]。图 6 所示为采用 Y₂O₃^[11, 24]和 BaZrO₃ 坩埚熔炼后合金的显微组织形貌。从图 6(a)可以很清晰地看出, 用 Y₂O₃ 坩埚熔炼后, 合金中有 Y₂O₃ 的夹杂; 而用 BaZrO₃ 坩埚熔炼后, 合金中没有发现夹杂物(见图 6(b)中 E 和 F)。从实验结果可以看出, BaZrO₃ 对 TiAl 合金熔体具有良好的化学惰性, 熔炼后未发现界面反应层存在, 高温下元素的扩散也并不明显; 与抗热震性较差的 Y₂O₃ 相比, 熔炼后合金中没有发现夹杂物, 且在相同的实验条件下合金中的氧增量也比 Y₂O₃ 的低。一般而言, 铸造 TiAl 合金可接受的氧含量应不超过 1.2×10⁻³^[24], 本实验中用 BaZrO₃ 坩埚在 1550℃保温 30 min 的条件下测得熔炼后合金中的氧含量为 1.653×10⁻³。根据 CHEN 等^[25]和 GAO 等^[26]研究了熔炼温度和熔炼时间对 TiAl 合金中氧含量的影响, 因此, 通过对熔炼工艺的改善, 有可能进一步降低熔炼后合金中的氧含量。

表 5 不同坩埚材料熔炼 TiAl 合金后合金中的氧含量

Table 5 Oxygen contents of melted metals in tested crucible

Oxide	Temperature/℃	Time/min	w(O)/10 ⁻⁶
MgO ^[8]	1550	30	9600
Al ₂ O ₃ ^[8]	1550	30	10900
CaO ^[8]	1550	30	2600
Y ₂ O ₃ -MgO ^[8]	1550	30	1900
BaZrO ₃	1550	30	1653

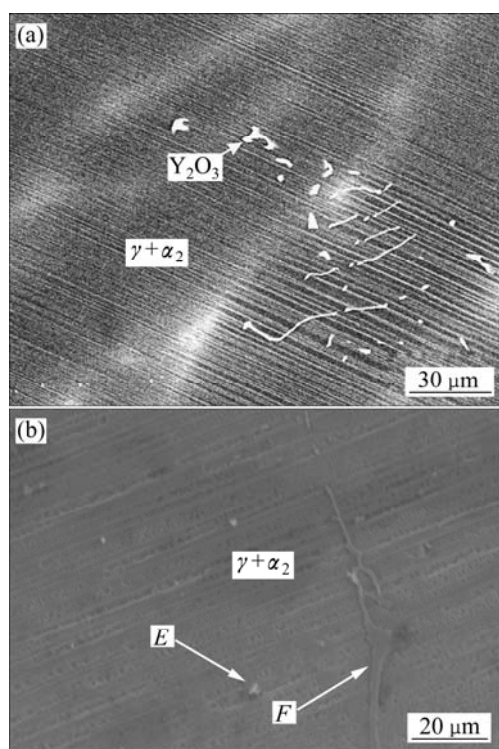


图 6 Y_2O_3 ^[11, 24]和 BaZrO_3 坩埚熔炼后合金中的夹杂物

Fig. 6 Inclusions in alloy melted by Y_2O_3 ^[11, 24](a) and BaZrO_3 crucible(b)

3 结论

1) 熔炼后合金的显微组织由大量不同取向的片层状 α_2 和少量条块状的 γ 相组成。

2) BaZrO_3 耐火材料对 TiAl 合金熔体具有良好的化学惰性, 熔炼后合金与坩埚界面清晰, 未发现界面反应层存在; 坩埚与合金的界面处有少量元素扩散, 但基体中未发现夹杂物。

3) 在该实验条件下, 与用 Y_2O_3 坩埚熔炼 TiAl 合金中的氧含量 1.9×10^{-3} 相比, 用自制 BaZrO_3 坩埚熔炼后合金中的氧含量为 1.653×10^{-3} 。

REFERENCES

- [1] 李成功, 傅恒志, 于 翹. 航空航天材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 16.
LI Cheng-gong, FU Hong-zhi, YU Qiao. Aerospace materials[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 16.
- [2] 陈玉勇, 苏勇君, 孔凡涛. TiAl 金属间化合物制备技术的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(3): 757–762.
CHEN Yu-yong, SU Yong-jun, KONG Fan-tao. Research

- progress in preparation of TiAl intermetallic based compound[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(3): 757–762.
- [3] 刘 娣, 张利军, 米 磊, 郭 凯, 薛祥义. TiAl 合金的制备及应用现状[J]. 钛工业进展, 2014, 31(4): 11–15.
LIU Di, ZHANG Li-jun, MI Lei, GUO Kai, XUE Xiang-yi. Preparation and application status of TiAl alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2014, 31(4): 11–15.
- [4] 张志勇, 徐向俊, 郝国建, 张来启, 林均品. 真空悬浮熔炼高铌 TiAl 合金铸锭的成分组织均匀性[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(12): 3063–3067.
ZHANG Zhi-yong, XU Xiang-jun, HAO Jian-guo, ZHANG Lai-qi, LIN Jun-pin. Homogeneity of composition and structure for high Nb containing TiAl alloy ingots prepared by vacuum levitation melting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(12): 3063–3067.
- [5] 黄淑梅, 韩明臣. 钛的悬浮熔炼与铸造[J]. 金属学报, 2002, 38(S): 334–336.
HUANG Shu-mei, HAN Ming-chen. Levitation melting and cast of titanium[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(S): 334–336.
- [6] 贾 均. 钛铝合金及其熔炼技术[J]. 特种铸造及有色合金, 1998(4): 8–10.
JIA Jun. TiAl alloys and its melting technology[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 1998(4): 8–10.
- [7] 黄金昌. 等离子电弧熔炼钛铝金属间化合物[J]. 钛工业进展, 1994, 11(5): 1.
HUANG Jing-chang. Plasma arc melting TiAl intermetallics[J]. Titanium Industry Progress, 1994, 11(5): 1.
- [8] KUANG J P, HARDING R A, CAMPBELL J. Investigation into refractories as crucible and mould materials for melting and casting γ -TiAl alloys[J]. Materials Science and Technology, 2000, 16: 1007.
- [9] EATESAMI D, HADAVI M M, HABIBOLLAHZADE A. Melting of γ -TiAl in the alumina crucible[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2009, 4(50): 363–367.
- [10] GOMES F, JOAQUIM B, SILVA R C. Induction melting of γ -TiAl in CaO crucibles[J]. Intermetallics, 2008, (16): 1292–1297.
- [11] TOSHIMITSU T, TOSHIHARU K, TAKASHI M, TATSUYA K, HIROSHI H. Evaluation of yttria applicability as a crucible for induction melting of TiAl alloy[J]. Materials Transactions, 2010, 51(9): 1656–1662.
- [12] ZHANG Z, XING F Y, ZHU M, LU X G, WU G X, LI C H. Vacuum induction melting of TiNi alloys using BaZrO_3 crucibles[J]. Materials Science Forum, 2013, (765): 316–320.
- [13] 张 钊, 朱凯亮, 刘岚洁, 鲁雄刚, 吴广新, 李重河. BaZrO_3 坩埚的制备及与钛合金熔体的界面反应[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(9): 1272–1283.
ZHANG Zhao, ZHU Kai-liang, LIU Lan-jie, LU Xiong-gang, WU Guang-xin, LI Chong-he. Preparation of BaZrO_3 crucible and its interfacial reaction with molten titanium alloys[J].

- Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(9): 1272–1283.
- [14] 高永辉, 庞威, 李重河, 鲁雄刚, 丁伟中, 钟庆东. CaZrO₃耐火材料的制备及其与钛合金熔体的界面反应[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(12): 2007–2011.
- GAO Yong-hui, PANG Wei, LI Chong-he, LU Xiong-gang, DING Wei-zhong, ZHONG Qing-dong. Preparation of CaZrO₃ crucible and its interfacial reaction with molten titanium alloys[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(12): 2007–2011.
- [15] 陈光耀, 贺进, 孟德珍, 吴广兴, 鲁雄刚, 李重河. SrZrO₃合成制备及与TiNi熔体的界面反应[C]//第十七届全国冶金反应工程学学术会议论文集. 中国学术期刊电子出版社, 2013: 48–51.
- CHENG Guang-yao, HE Jin, MENG De-zhen, WU Guang-xing, LU Xiong-gang, LI Chong-he. Solid synthesis preparation of SrZrO₃ and its interfacial reaction with TiNi melt[C]// The National Metallurgical Reaction Engineering Academic Conference Proceedings. China Academic Journal Electronic Press, 2013: 48–51.
- [16] 杨波, 朱凯亮, 鲁雄刚, 李志林, 吴铸, 吴广兴, 李重河. TiFe基储氢合金的CaZrO₃坩埚制备及储氢性能[J]. 过程工程学报, 2012, 12(5): 849–856.
- YANG Bo, ZHU Kai-liang, LU Xiong-gang, LI Zhi-lin, WU Zhu, WU Guang-xing, LI Chong-he. Preparation of TiFe based alloys melted by BaZrO₃ crucible and its hydrogen storage properties[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2012, 12(5): 849–856.
- [17] 朱文琪, 贺进, 卫尔蒂妮, 汪宏斌, 李重河. 钛合金用BaZrO₃基复合型壳的制备[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(4): 1085–1088.
- ZHU Wen-qi, HE Jin, WEIER Di-ni, WANG Hong-bin, LI Chong-he. Preparation of BaZrO₃-based mould shell for titanium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(4): 1085–1088.
- [18] 陈玉勇, 孔凡涛. TiAl基合金新材料研究及精密成形[J]. 金属学报, 2002, 38(11): 1141–1148.
- CHEN Yu-yong, KONG Fan-tao. Research on TiAl based alloys materials and precision forming[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(11): 1141–1148.
- [19] IMAYEV R M, IMAYEV V M, OEHRING M, APPEL F. Alloy design concepts for refined gamma titanium aluminide based alloys[J]. Intermetallics, 2007, 15: 451–460.
- [20] LAY L A. Corrosion resistance of technical ceramics[J]. International Materials Reviews, 1993, 38(3): 155–156.
- [21] 罗文忠, 沈军, 闵志先, 傅恒志. TiAl合金定向凝固过程中与坩埚材料的界面反应研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(8): 1441–1445.
- LUO Wen-zhong, SHEN Jun, MIN Zhi-xian, FU Heng-zhi. Investigation of interfacial reactions between TiAl alloy and crucible materials during directional solidification process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(8): 1441–1445.
- [22] ZHANG H R, TANG X X, ZHOU C G, ZHANG H, ZHANG S W. Comparison of directional solidification of γ -TiAl alloys in conventional Al₂O₃ and novel Y₂O₃-coated Al₂O₃ crucibles[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2013, 33: 925–934.
- [23] 陈玉勇, 韩建超, 肖树龙, 徐丽娟, 田竟. 稀土Y在 γ -TiAl基合金及其精密热成形中应用的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5): 1241–1249.
- CHEN Yu-yong, HAN Jian-chao, XIAO Shu-long, XU Li-juan, TIAN Jing. Research progress of rare earth yttrium application in γ -TiAl based alloy and precision thermal forming[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5): 1241–1249.
- [24] LAPIN J, GABALCOVÁ Z, PELACHOVÁ T. Effect of Y₂O₃ crucible on contamination of directionally solidified intermetallic Ti-46Al-8Nb alloy[J]. Intermetallics, 2011, 19: 396–403.
- [25] CHEN B, MA Y C, GAO M, LIU K. Changes of oxygen content in molten TiAl alloys as a function of superheat during vacuum induction melting[J]. Journal of Material Science and Technology, 2010, 26(10): 900–903.
- [26] GAO M, CUI R J, MA L M, ZHANG H R, TANG X X, ZHANG H. Physical erosion of yttria crucibles in Ti-54Al alloy casting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211: 2004–2011.

(编辑 龙怀中)