

微合金元素对 Ti-45Al-8Nb 合金流动性能的影响

杨 亮¹, 吴丽娟², 柴丽华², 陈子勇², 林均品¹

(1. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083;

2. 北京工业大学 材料学院, 北京 100022)

摘 要: 采用 8×8 网格蜡网制备包埋料型壳, 对比研究各微合金元素对 Ti-45Al-8Nb 合金熔体流动充型性能的影响。结果表明: 微量 Si、Y、Cr、B、Ni 元素的加入能够提高 Ti-45Al-8Nb 合金的流动性能; 而 W、Co 元素的作用不明显; Mo、V 对基体合金的流动性不利。通过铸造模拟软件 Procast 对比分析, Cr、Ni 的加入提高合金过热, 增大了固液相线温度差, 提高了熔体的流动性; Si 和 Y 提高合金的抗氧化性, 减少熔体与型壳的反应程度, 从而提高合金的流动性; B 提高熔体流动性的原因归结为其细化作用。

关键词: 高 Nb-TiAl 合金; 铸造; 合金化; 流动性; Procast 模拟

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Effects of micro-alloy elements on fluidity of Ti-45Al-8Nb alloy

YANG Liang¹, WU Li-juan², CHAI Li-hua², CHEN Zi-yong², LIN Jun-pin¹

(1. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Embedded material shell was prepared using wax grid with 8×8 mesh. The effects of micro-alloy elements on the fluidity and mold filling property of Ti-45Al-8Nb melt were studied. The results show that the fluidity and mold filling property of Ti-45Al-8Nb melt are improved by Si, Y, Cr, B, Ni addition. However, W and Co show no apparent effectiveness. Mo and V have a negative impact on the fluidity. Procast, the casting simulation software was used to analyze the reasons. Cr and Ni can reduce the melting point and increase the superheat temperature, so, the fluidity of the melt is increased. Si and Y improve the oxidation resistance of alloy and reduce the reaction between melt and shell, therefore, the fluidity of the alloy enhances. B improves the fluidity property attributed to its refinement.

Key words: high Nb-containing TiAl alloy; casting; alloying; fluidity; Procast simulation

作为新一代 TiAl 合金, 高 Nb-TiAl 合金具有更高的使用温度、高强度、更好的高温抗氧化性和蠕变抗力等优点^[1-2], 有望替代 Ni 基高温合金, 应用于航空发动机涡轮叶片、汽车增压涡轮等结构部件^[3]。因为这些零件普遍是具有复杂结构的薄壁零件, 况且铸造高 Nb-TiAl 合金的室温塑性低, 加工性较差, 所以, 采用近终成型的熔模精密铸造技术是最为可行的方法之一^[4]。因此, 研究高 Nb-TiAl 合金的熔模铸造性能,

即熔体的流动充型性能, 对铸造合金的成分设计和熔模铸造生产具有实际指导意义。

HINMAN 等^[5]最先采用蜡网制作熔模型壳方法评价合金的流动性能。此方法具有操作简单、可重复性好、结果直观等优点。赵而团等^[6]采用此方法, 成功地测试了 IMI834 高温钛合金的铸造充型性能。在此, 本文作者采用 8×8 网格蜡网, 制备包埋料型壳, 研究不同微合金元素对 Ti-45Al-8Nb(摩尔分数, %)合金流

动充型性能的影响, 并利用铸造模拟软件 Procast 进行模拟分析, 讨论各合金元素对流动性的影响机制。

1 实验

采用真空电弧熔炼制备名义成分为 Ti-45Al-8Nb-X 的 40 g 纽扣锭, X 为 Cr、Ni、V 等微合金元素。采用 8×8 蜡网, 共 144 条边, 制备包埋料型壳。蜡网具体尺寸如图 1 所示。

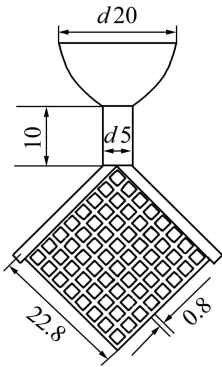


图 1 蜡网尺寸
Fig. 1 Dimensions of wax pattern (Unit: mm)

包埋材料采用以氧化锆为主要成分的金属氧化物混合物, 经过 900 ℃、3 h 焙烧脱蜡、成型。制备的包埋料模壳如图 2(a)所示。充型实验在重力浇注铸钛机

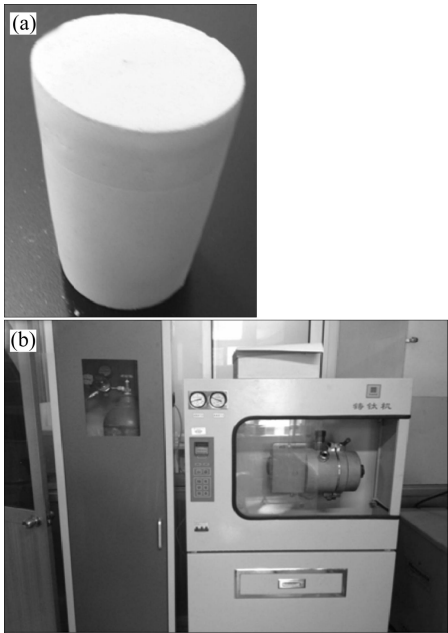


图 2 模壳和铸钛机
Fig. 2 Mould(a) and casting titanium machine(b)

上进行, 实验设备如图 2(b)所示。实验采用熔炼电流 500 A、熔炼时间 45 s、模壳预热温度 200 ℃的工艺方案。

2 结果与分析

充型性能指标的计算方法为: 每条充填完整的边算 1, 不完整的边算 0.5, 各合金成分实验结果如图 3 所示, 数值汇总结果见表 1。基体合金成分为 Ti-45Al-8Nb, 添加其他微合金元素后, 以其微合金元素命名。比如表 1 中合金名称 0.5Si 即代表具体合金成分为 Ti-45Al-8Nb-0.5Si。

表 1 实验结果

Table 1 Experiment results				
Ti-45Al-8Nb	0.5Si	0.5Y	0.5Cr	0.5B
34	49	45	44.5	43.5
0.5Ni	0.5W	0.5Co	0.5Mo	0.5V
41.5	35	34	28.5	27.5

由以上数据可以看出, 基体材料 Ti-45Al-8Nb 的填充边数为 34, 加入 0.5Si 之后填充边数增加最多, 如图 3(b)所示, 达到 49, 增加 44%。

对基体合金流动充型性有利的元素还有 Y、Cr、B、Ni; 对基体合金流动充型性无明显影响的有 W 和 V; 对基体合金流动充型性不利的是 Mo 和 Co。影响合金流动性的原因有很多, 包括浇注过热度、固液相线温度、金属液的黏度、晶粒尺寸、抗氧化性能等^[7]。

2.1 固液相线温度对流动性的影响

通过铸造模拟软件 Procast 模拟各合金流动充型过程, 并计算得到各合金的热物性参数, 见表 2。

通过模拟调整工艺参数, 当浇注温度为 1 550 ℃时, 即过热温度为 44 ℃时, 模拟结果与实验结果吻合较好。图 4 所示为 Ti-45Al-8Nb 合金实验与模拟结果。

许多研究指出, 流动性与过热度存在密切关系^[8-9]。在浇注温度一定的条件下, 降低液相线温度即提高浇注过热度会降低金属液的黏度, 从而使熔体的流动性提高。本实验中, 熔炼电流不变, 为 500 A, 即浇注温度是固定不变的。微量 Si 和 B 的加入明显降低了合金的液相线温度(10 ℃以上), 提高了熔体的过

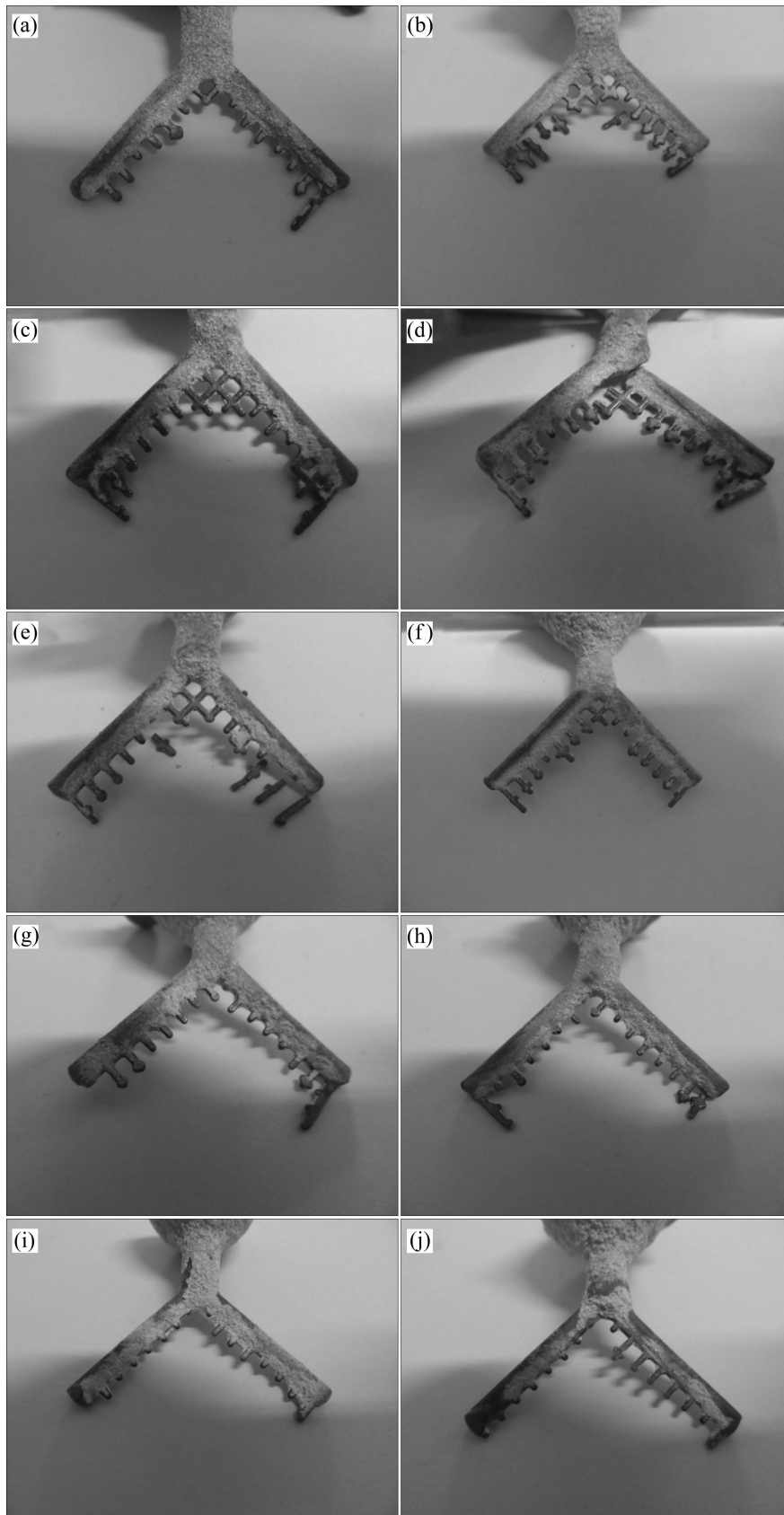


图3 各合金成分的充型结果

Fig. 3 Mode filling capacity of Ti-45Al-8Nb(a), Ti-45Al-8Nb-0.5Si(b), Ti-45Al-8Nb-0.5Y(c), Ti-45Al-8Nb-0.5Cr(d), Ti-45Al-8Nb-0.5B(e), Ti-45Al-8Nb-0.5Ni(f), Ti-45Al-8Nb-0.5W(g), Ti-45Al-8Nb-0.5V(h), Ti-45Al-8Nb-0.5Mo(i) and Ti-45Al-8Nb-0.5Co(j)

表 2 材料的热物性参数

Table 2 Thermophysical parameters of investigated materials

Ti-45Al-8Nb-X	$t_l/^{\circ}\text{C}$	$t_s/^{\circ}\text{C}$	$(t_l-t_s)/^{\circ}\text{C}$	Filled edge
—	1 506	1 444	62	34
0.5Si	1 492	1 403	89	49
0.5Y	1 507	1 444	63	45
0.5B	1 495	1 428	67	44.5
0.5Cr	1 497	1 317	180	43.5
0.5Ni	1 497	800	697	41.5
0.5W	1 506	1 444	62	35
0.5Co	1 511	1 444	67	34
0.5Mo	1 499	1 321	178	28.5
0.5V	1 499	1 405	94	27.5

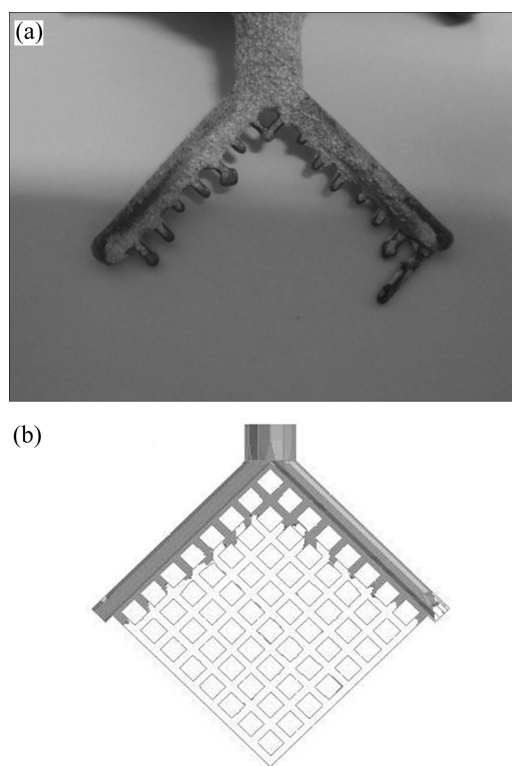


图 4 实验结果与模拟结果的比较

Fig. 4 Comparison of experiment result(a) and simulation result(b)

热度, 所以提高了合金的流动性。Cr、Ni 的加入也降低了熔体的液相线温度, 同时明显提高固液相线区间, 使熔体在糊状区时间延长, 延长了流动时间。同理, Co 和 W 对合金固液相线影响不明显, 所以对合金流动性的影响不大。

2.2 黏度对流动性的影响

黏度是影响流动性的重要参数之一。黏度越大, 合金流动性越差, 充型能力越低^[10]。熔体的黏度是随温度变化的, 一般地, 温度越低, 黏度越高。熔体流动充型过程中, 随着温度的降低, 固相开始析出, 熔体黏度上升, 流动速度降低。当析出固相达到临界固相率(0.2~0.4)^[11]时, 流动停止。添加不同的合金元素,

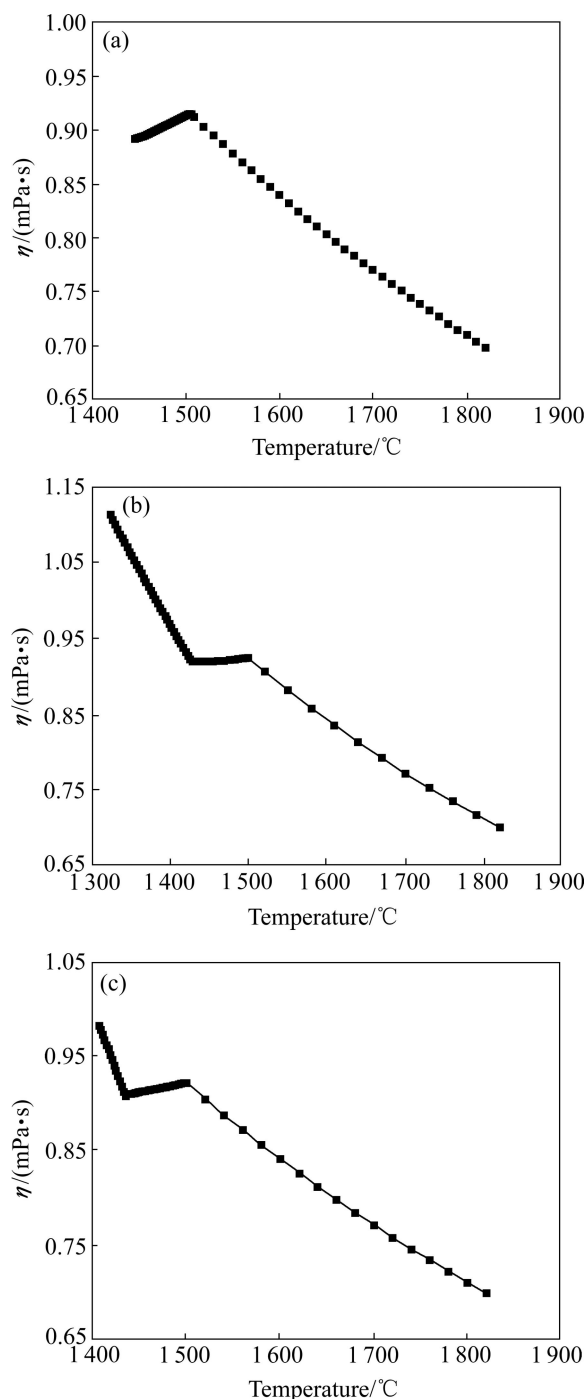


图 5 各合金黏度的比较

Fig. 5 Comparison of viscosity of Ti-45Al-8Nb(a), Ti-45Al-8Nb-0.5Mo(b) and Ti-45Al-8Nb-0.5V(c)

会影响合金的黏度。图 5(b)和(c)所示为添加 Mo 和 V 后合金的黏度随温度的变化曲线。由图 5(b)和(c)可以看出,当在基体中添加 Mo 和 V 元素后,合金黏度在糊状区温度范围内显著升高,会使得熔体在凝固过程中很快达到临界固相率而停止流动,导致金属液在糊状区流动时间变短,最终使流动性下降。

2.3 晶粒细化对流动性的影响

KWON 等^[11]研究了细化晶粒对 Al-Cu 合金流动性的影响。实验结果指出,当晶粒尺寸从 1 mm 减小到 0.1 mm 时,合金流动长度增长 2 倍,从而说明细化晶粒可以提高合金的流动性。细小的晶粒会阻碍粗大树枝晶的生长,从而使临界固相率提高^[12],因此,会增加流动时间与充型长度。

B 和 Y 元素的添加可以有效细化 TiAl 合金组织^[13-14]。WANG 等^[13]研究了 B 对 Ti-45Al-8Nb 合金的细化作用。当 B 含量大于 0.3%时,可以明显地改变合金 α 相形貌,从粗大的片层转变为细小的等轴晶。李宝辉等^[14]指出,在 Ti-47Al 中添加 0.3%Y,合金平均晶粒尺寸从 1 200 μm 降到 200 μm 。本实验中, B 和 Y 的添加提高了合金的填充长度,使填充长度从 34 分别增加到 44.5 和 45。这与 B 和 Y 对合金的细化作用有关。

2.4 抗氧化性对流动性的影响

提高合金的抗氧化性能,一方面可以减少高温熔体表面形成氧化膜含量,从而降低金属熔体表面张力,提高合金流动性^[15];另一方面,提高抗氧化性可以减少熔体与模壳材料之间的反应程度,提高边界熔体的流动速度。研究表明, Y 和 Si 能够提高 TiAl 合金的高温抗氧化性能^[16-17]。在本实验中,填充长度也从 34 增加到了 45 和 49。

3 结论

对于 Ti-45Al-8Nb 合金,添加微量 Si、Y、Cr、B、Ni 元素对合金流动性有利; Co、W 对合金流动性的影响不大;而 Mo、V 对合金流动性是有害的。归结其原因为添加微量 Si、B、Cr、Ni 提高了合金过热度与改变糊状区温度区间;添加 B 和 Y 细化了合金晶粒;添加 Y 和 Si 提高了合金抗氧化性能。Mo 和 V 的加入明显提高了合金的黏度,所以,对流动性产生不

利影响。

REFERENCES

- [1] CHEN G L, WANG J G, NI X D, LIN J P, WANG Y L. A new intermetallic compound in TiAl+Nb composition area of the ternary system[J]. *Intermetallics*, 2005, 13: 329-336.
- [2] YOSHINARA M, MIURA K. Effect of Nb on oxidation behavior of TiAl[J]. *Intermetallics*, 1995, 3(5): 357-363.
- [3] LORIA E A. Gamma titanium aluminide as prospective structural materials[J]. *Intermetallics*, 2000, 8: 1339-1345.
- [4] 李飞, 王飞, 陈光, 万柏方, 戴炎麟, 陆敏. 熔模精密铸造 TiAl 基金属间化合物研究进展[J]. *中国材料进展*, 2010, 29(2): 24-30.
LI Fei, WANG Fei, CHEN Guang, WAN Bai-fang, DAI Yan-lin, LU Min. Review of the investment casting of TiAl based intermetallic alloys[J]. *Material China*, 2010, 29(2): 24-30.
- [5] HINMAN R W, TESK J A, WHITLOCK R P, PARRY E E, DURKOWSKI J S. A technique for characterizing casting behavior of dental alloys[J]. *Journal of Dental Research*, 1985, 64(2): 134-138.
- [6] 赵而团, 孔凡涛, 肖树龙, 陈艳飞, 陈玉勇. IMI834 高温钛合金熔模铸造充型性能[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(S1): s843-s846.
ZHAO Er-tuan, KONG Fan-tao, XIAO Shu-long, CHEN Yan-fei, CHEN Yu-yong. Investment casting mold filling capacity of high temperature titanium alloy IMI834[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(S1): s843-s846.
- [7] LIN C B, HUNG Y W, LIU W C, KANG S W. Machining and fluidity of 356Al/SiC_(p) composites[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 110: 152-159.
- [8] TAGHADDOS E, HEJAZI M M, TAGHIABADI R, SHABESTARI S G. Effect of iron-intermetallics on the fluidity of 413 aluminum alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 468: 539-545.
- [9] WANG Q, LU Y, ZENG X Q, DING W J, ZHU Y P, LI Q H, LAN J. Study on the fluidity of AZ91+xRE magnesium alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, 271: 109-115.
- [10] 黄虹, 金山同. 连铸用保护渣的黏度与流动性关系的研究[J]. *炼钢*, 2003, 19(4): 43-46.
HUANG Hong, JIN Shan-tong. Study on the relationship between viscosity and fluidity of mold flux[J]. *Steelmaking*, 2003, 19(4): 43-46.
- [11] KWON Y D, LEE Z H. The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of Al-4.5Cu-0.6Mn and A356 alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 360: 372-376.
- [12] AMNBERG L, CHAI G, BACKERUD L. Determination of dendritic coherency in solidifying melts by rheological

- measurements[J]. Materials Science and Engineering A, 1993, 173: 101–103.
- [13] WANG W D, MA Y C, CHEN B, GAO M, LIU K, LI Y Y. Effects of boron addition on grain refinement in TiAl-based alloys[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2010, 26(7): 639–647.
- [14] 李宝辉, 陈玉勇, 孔凡涛. Y 对 TiAl 合金显微组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(12): 762–765.
- LI Bao-hui, CHEN Yu-yong, KONG Fan-tao. Effect of Y on the microstructure and property of TiAl alloy[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2006, 26(12): 762–765.
- [15] NIYAMA E, AUZAI K, RJNAKUBO T, HIRATSUKA S. Some basic research for thin-wall casting technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63: 779–783.
- [16] ZHAO L L, LI G Y, ZHANG L Q, LIN J P, SONG X P, YE F, CHEN G L. Influence of Y addition on the long time oxidation behaviors of high Nb containing TiAl alloys at 900 °C[J]. Intermetallics, 2010, 18: 1586–1596.
- [17] JIANG R, WANG Z L, MA W S, FENG X R, DONG Z Q, ZHANG L, LIU Y. Effects of Nb and Si on high temperature oxidation of TiAl[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18: 512–517.

(编辑 杨 华)