

添加稀土元素对铸态 TiAl 基合金 微观组织和力学性能的影响^①

陈仕奇 曲选辉 雷长明 黄伯云

(中南工业大学粉冶所, 长沙 410083)

摘 要 研究了稀土元素 La、Ce、Tb、Dy 对铸态 Ti-48Al 组织与力学性能的影响规律。结果表明, La 的加入对 TiAl 有着较好的改善作用。在 0.2 at.-%La 处, 不仅强度提高, 且延性明显增加; 而 Ce、Tb、Dy 均使强度直线下降, 下降值依次增加, 对延性改善甚微。分析表明, 这四种稀土元素均可以细化铸态组织, 使树枝状初晶相对量增加, 枝晶间距减小。而断口观察表明, Ce、Tb、Dy 较 La 易于导致 TiAl 中形成气孔和粗大第二相粒子, 是其作用较差的原因。这一现象主要是由于不同稀土元素的蒸汽压和在 TiAl 中的固溶度不同所致。

关键词 稀土 TiAl 显微组织 力学性能

TiAl 合金是当前研究较多的新型高温合金, 由于它具有优异的高温性能以及密度小而受到青睐, 阻碍该合金应用的则是其室温脆性大。根据现有的研究结果, TiAl 的室温脆性归于两方面: 一是 TiAl 相固有的脆性, 二是间隙原子如氧等的不良影响。对于前者可以添加 Cr、Mn、V 等合金元素, 改变 TiAl 相的变形方式, 使塑性得到提高; 而对于后者尽管可以采用高纯原料加以解决, 但会使生产成本大幅度上升, 且工艺上不易实现。Vasudevan 等人^[1]对 Ti-48Al 的研究表明, 在 TiAl 中加入稀土 Er 后, 由于在基体中形成了 Er_2O_3 弥散粒子, 可以降低 TiAl 中的氧含量, 而使塑性提高。本文选取了稀土 La、Ce、Tb、Dy 作为添加剂。系统研究了这四个元素对 TiAl 合金铸态组织和力学性能的影响。

1 试验材料及方法

试验所用的原材料为 99.6% 的海绵 Ti、

99.9% Al 及高纯稀土 La、Ce、Tb、Dy。将单一稀土按一定配比与 Ti、Al 在非自耗电弧炉中溶炼成钮扣式合金锭。合金熔炼前, 先将熔炼室抽至小于 $5 \times 10^{-3} \text{Pa}$, 然后充氩气保护, 每批合金熔炼四遍以使合金成份均匀。合金成份为: Ti 和 Al 的原子比为 52:48, 稀土原子百分比分别为 0、0.2、0.5、1.0、1.5、2.0。合金锭经线切割加工成抗弯试样, 然后进行金相与力学性能分析, 每个试验点至少取三个试样。

金相组织在 Neophot-2 型金相显微镜上进行; 三点弯曲实验在 WD-100B 电子拉伸试验机上进行, 弯曲试样尺寸为 $2 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 跨距为 25 mm, 十字头下移速率为 0.2 mm/min。

2 试验结果

2.1 稀土对铸态 TiAl 合金相组织的影响

图 1 是添加 La、Ce 合金的铸态组织, 从

^① 国家八六三计划资助项目 收稿日期: 1993-11-20

图中可以看出，随着稀土 La 和 Ce 加入量的增加，树枝状初晶的相对量均增加，并且枝晶也

明显细化。对添加 Tb 和 Dy 合金的金相分析表明，Tb 和 Dy 有与 La 和 Ce 相似的作用。

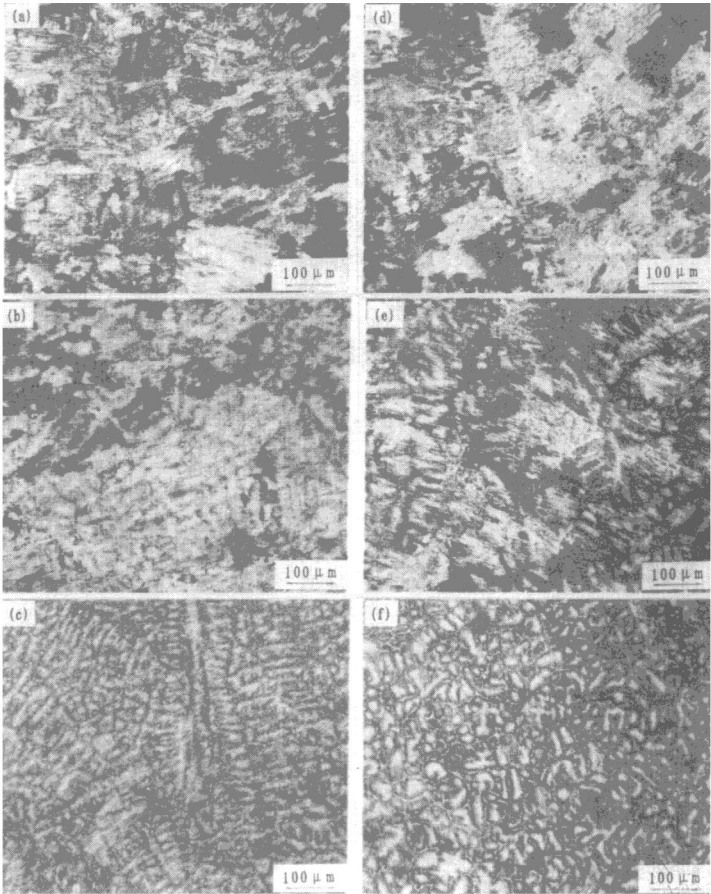


图 1 TiAl 与 TiAlCe 合金铸态金相组织
(a)—0.2 at.-% La; (b)—0.5 at.-% La; (c)—2.0 at.-% La;
(d)—0.2 at.-% Ce; (e)—0.5 at.-% Ce; (f)—2.0 at.-% Ce

2.2 稀土对 TiAl 合金断口形貌的影响

图 2 是添加 La、Ce 合金的断口形貌，从图中可以看出，当稀土含量较低时，断口形貌仍以解理断裂为主，与 Ti-48Al 二元合金不同的是，在含稀土 TiAl 合金的断口中有较多的撕裂痕，表明试样在断裂前经历了较大的塑性变形，但 TiAlCe 与 TiAlLa 合金的断口形貌又

有明显的不同，TiAl+0.2Ce 的晶界呈疏松结构状，有较多的孔隙，而 TiAl+0.2La 的晶界呈较紧密的结构，孔隙较少，如图(a)、(d)所示。随稀土含量增加，TiAlCe 合金不仅晶界孔隙数量增加，尺寸变大，而且在基体中也出现了气孔和第二相粒子，而 TiAlLa 合金中则较少有这一现象，如(b)、(e)所示。而当稀土含

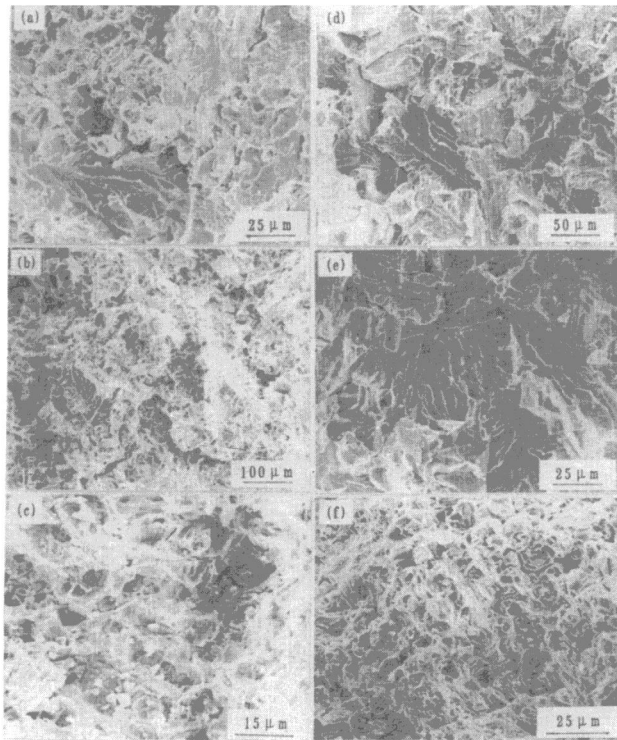


图 2 TiAlCe 与 TiAlLa 合金断口形貌
(a)—0.2at.-% Ce; (b)—0.5at.-% Ce; (c)—2.0at.-% Ce;
(d)—0.2 % La; (e)—0.5 at.-% La; (f)—2.0 at.-% La

量较高时,无论是TiAl+La还是TiAl+Ce合金,其断口呈初窝断裂的特征,初窝中存在较大的第二相粒子,而且在基体中均有气孔存在,如图(c)、(f)所示。TiAlDy和TiAlTb的断口形貌与TiAlCe合金相似,只是气孔更为明显。

2.3 稀土对铸态TiAl合金力学性能的影响

图3和图4分别是铸态稀土TiAl合金抗

弯强度和挠度与稀土含量的关系。图3的强度曲线表明,TiAl的强度开始时随着La的增加而增加,在1.0at.-%含量处达到峰值,然后强度随La含量的继续增加而下降;而添加Ce、Tb、Dy合金的强度均随其含量增加而直线下降。值得注意的是TiAlLa的强度远高于其它稀土TiAl合金,加Ce、Tb、Dy合金的强度非常接近。图3的曲线还表明,当加入量为0.2at.-%时,稀土对合金的塑性均有有利的影响,且以La的作用最为显著,TiAl+0.2La的挠度与二元TiAl相比,提高近1倍。当稀土元素含量超过0.2at.-%时,稀土对TiAl合金的延性改善作用消失。甚至使合金变得更脆。

3 讨论

以上结果表明:添加稀土可以细化TiAl合金的铸态组织,细化效果随稀土量的增加而加强,这是由于:一方面稀土是表面活性元素,可以降低TiAl液体的表面张力^[2],从而降低形成临界尺寸晶核所需的功,增加结晶核心;另一方面,稀土对氧原子有很强的亲和力,它们很容易吸收TiAl中的氧原子形成高稳定性的氧化物,这些质点在合金凝固前就已形成,从而成为非自发形核核心,而且这些质点还可以阻止晶粒长大,使其保持细小的晶粒组织,改善TiAl合金的性能。

从断口分析可知,随着稀土含量增加,TiAl合金基体本身的塑性变形特征增加,这一现象在于稀土夺取了TiAl基体中的氧原子,使TiAl相的塑性变形能力增加^[3]。Vasudevan等人^[1]的研究表明,氧等间隙原子严重损害TiAl合金的塑性。稀土元素可以净化TiAl基体,从而使性能提高。断口形貌表明,Ce、Tb、Dy较La更易导致在TiAl中形成晶界孔隙和较大的第二相粒子,使TiAl性能下降,这一现象是稀土元素蒸汽压不同所致。下面是三个温度下四个稀土元素蒸汽压比较^[4]:

$$1500\text{K} \quad \text{La} < \text{Ce} < \text{Dy} < \text{Tb}$$

$$2000\text{K} \quad \text{La} < \text{Ce} < \text{Tb} < \text{Dy}$$

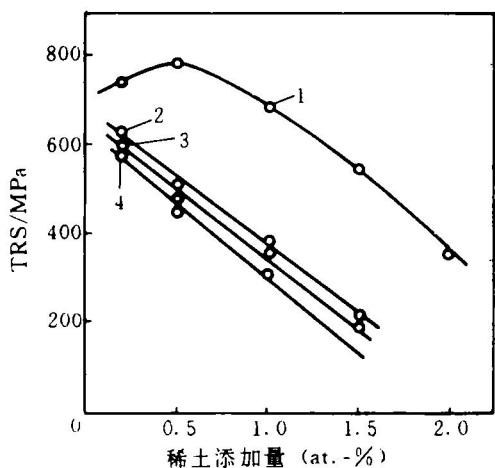


图3 TiAl合金铸态抗弯强度(TRS)与稀土添加量的关系

1—TiAlLa; 2—TiAlCe; 3—TiAlTb; 4—TiAlDy

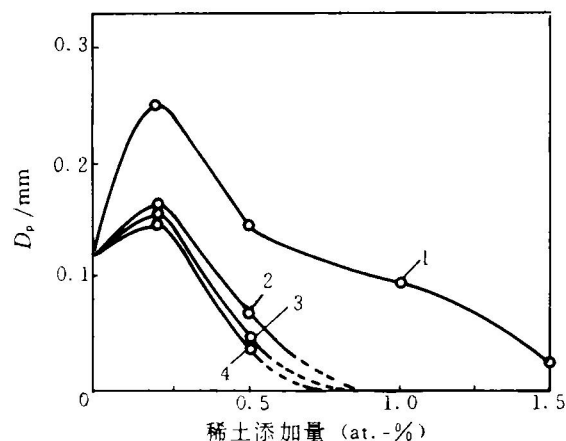


图4 TiAl合金铸态抗弯挠度(Dp)与稀土添加量的关系

1—TiAlLa; 2—TiAlCe; 3—TiAlTb; 4—TiAlDy

3 000K La<Ce<Tb<Dy

稀土 TiAl 合金制备均由电弧熔炼, 熔炼温度 2 000 K 左右, 而稀土元素蒸汽压较高, 在熔炼中挥发严重, 合金熔炼后经水冷铜坩埚冷却, 冷速快导致稀土蒸气不能及时排出, 保留在合金中形成气孔, 尤其在后凝固的地方如晶界处更为严重。这样蒸汽压愈高的元素, 愈易形成气孔。根据蒸汽压的大小, 稀土 TiAl 中气孔按 La、Ce、Tb、Dy 顺序加强, 这一推测结果与试验结果相符。同时, 断口观察还表明 Ce、Tb、Dy 更易在 TiAl 中形成粗大第二相粒子, 表明 Ce、Tb、Dy 较 La 在 TiAl 中的固溶度更小, 若采用快速冷凝技术扩大这些元素的固溶度, 并借助粉末冶金方法成型以消除气孔, 可期望 Ce、Tb、Dy 与 La 有相同效果。

4 结论

(1) 稀土 La、Ce、Tb、Dy 对 TiAl 铸态组

织有明显的细化作用, 并随含量增加, 细化效果加强。

(2) 添加 La 可以得到组织致密、无粗大析出相, 性能良好的 TiAl 铸锭; 添加 Ce、Tb、Dy 则引起铸锭孔洞增加, 析出相粗大, 性能恶化。

(3) TiAl+La 合金的最佳 La 含量为 0.2 at.-%, 最佳性能: TRS=730 MPa, $D_p=0.25$ mm。

参考文献

- 1 Vasudevan V *et al.* Scripta Metall, 1989; 23(6): 907.
- 2 《稀土》编写组编. 稀土(下). 北京: 冶金工业出版社, 1976, 353.
- 3 陈仕奇, 曲选辉, 雷长明, 黄伯云. 金属学报, 1994, 30(1): 20.
- 4 中山大学编. 稀土物理化学常数手册. 北京: 冶金工业出版社, 1976.

(上接 58 页)

学、复合材料力学和复合材料物性估计技术, 设计过程复杂, 但其对梯度功能材料的合成有着重大的理论和实际意义。

参考文献

- 1 郑子樵, 梁叔全等. 宇航材料与工艺, 1992, 23(6): 17.

- 2 Tohru Hirano, Junichi Teraki *et al.* In: Proceedings of the First International Symposium on FGM, Sendai, Japan, 1990, 5.
- 3 Robert M J(著). Mechanics of Composite Materials, Washington: Scripta Book Company, 1975, 99.
- 4 Takashi Ishikawa. In: Proceedings of the First International Symposium on FGM, Sendai, Japan, 1990: 11.