

钨、硼对 Ti-42Al-5Mn 合金热物性参数的影响

李小兵¹, 舒磊¹, 潜坤¹, 陈波¹, 刘奎¹, 林鲲²

(1. 季华实验室, 广东 佛山 528200)

(2. 北京科技大学 固体化学研究所, 北京 100083)

摘要: 材料的导热和膨胀性能是影响其应用的重要因素, 本工作以低成本、易变形的 Ti-42Al-5Mn 合金(原子分数, % , 下同)为研究对象, 研究了钨、硼微合金化对合金的热扩散速率、热导率、热膨胀性等热物性参数的影响。结果表明, 随着 W 含量提高至 1.0at%, 合金的热扩散率稍有降低, 反之 B 含量提高至 0.3at%, 合金的热扩散率略有增加。W 添加降低合金导热性能与其增加组织中 β_0 相含量有关。对于 β 凝固 γ -TiAl 合金, γ 、 α_2 、 β_0 三相导热能力大小顺序应为 $\gamma > \alpha_2 > \beta_0$ 。而 B 提高合金的导热性能与 B 在合金中形成的含 B 第二相粒子有关。W 对合金热膨胀性影响较小, 在 100~300 °C 范围内, 随着 W 含量提高至 1.0at%, 合金的平均线膨胀系数稍有降低, 相反在更高温度时的影响逐渐减小。TiAl 合金的热膨胀系数数值与铸铁相当, 低于钢铁、镍基高温合金等材料, 在制造诸如活塞这类要求热膨胀系数很低的部件时具有一定的应用价值。

关键词: β 凝固 γ -TiAl 合金; 变形; 热物性参数; Mn; W

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)04-1338-07

γ -TiAl 基金属间化合物独特地结合了低密度(约 4.0 g/cm³)、高比强度和优良的高温抗氧化性能成为航空航天、先进舰船、军用战机、大型卡车等发动机领域极具竞争力的尖端战略结构材料^[1-2]。尤其是新型 β 凝固 γ -TiAl 合金在高温时还具有可提供足够数量独立滑移系的无序 β 相, 表现出良好的热加工能力^[3-4]。目前国际上已经等温锻造出 TNM (Ti-43Al-4Nb-1Mo-0.1B) 低压涡轮叶片并在空客 A320neo 飞机的 PW1100G 发动机上实现了首飞^[5]。然而, 这类含 Nb 合金 (Nb 含量 $\geq 4.0at\%$) 铸锭在冷却过程中高温部分无序 β 相会经有序化反应形成有序 β_0 相过冷至室温, 在铸锭凝固组织或预期服役温度范围 β_0 相会析出脆性的 ω_0 (Ti₄Al₃Nb) 相, 影响合金的室温塑性、组织稳定性和服役性能^[6]。此外, 合金制备时需要加入大量的高成本 Nb 元素, 且这类合金变形能力较差, 只能采用包套、等温等锻造手段, 致使部件成型制造成本昂贵^[7]。相比而言, 金属 Mn 的 β 相稳定作用约为 Nb 的 8/3 倍^[8], 对合金高温变形能力改善作用明显, 同时 Mn 可降低堆垛层错能和增加反相畴界能, 改善合金室温塑性^[9], 而且金属 Mn 的成本显著低于 Mo、Nb 等元素。因此, 基于 Mn 合金化的 β 凝固 γ -TiAl 合金成本低、高温变形能力强, 将具有广阔的工业应

用前景, 正逐渐成为业内研究热点。

回顾近几十年 TiAl 合金研究与应用进程, 因其轻质、高比强、耐高温特性, 常被制造成低压涡轮叶片、高压压气机叶片、气阀、涡轮增压器等航空发动机和内燃发动机关键热端部件, 以期替代上述部件现役 Ni 基高温合金、耐热钢、高强钢等, 达到耐高温和减重的双重目标^[2,5,10]。目前已有一些 TiAl 合金部件真正意义上实现了应用, 主要包括低压涡轮叶片和 F1 赛车气阀^[11]。作为一种新材料, 在不断探索 TiAl 合金可能可替代的热端部件时, 掌握其导热、热膨胀等热物性参数特性显得尤为重要。尽管有文献报道了一些 TiAl 合金相关的热物性参数特性^[12], 但未提及低 Al 的易变形含锰 β 凝固 γ -TiAl 合金, 且为了实现 TiAl 合金热加工变形要求的 Al 含量降低所带来合金热物性参数变化规律也尚不明确。为此, 本工作以一类易变形的含锰 β 凝固 γ -TiAl 合金为对象, 系统测试了合金的热扩散速率、热导率、热膨胀性等热物性参数, 分析了不同 TiAl 合金体系热物性参数演变规律, 揭示了相、合金元素 W 和 B 对 β 凝固 γ -TiAl 合金导热和热膨胀性能的影响, 为 TiAl 合金的应用提供必要的数据支撑, 并与可能替代的相关材料热物性特征进行分析对比, 以期进一步拓宽 TiAl 合金的可能应用领域。

收稿日期: 2022-04-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51971215); 季华实验室科研项目 (X210291TL210)

作者简介: 李小兵, 男, 1988 年生, 博士, 副研究员, 季华实验室, 广东 佛山 528200, E-mail: lixb@jihualab.ac.cn

1 实验

采用真空感应熔炼方式制备了系列 Ti-42Al-5Mn-(0~1.0)W-(0~0.3)B 合金铸锭, 每个锭重约 10 kg。Ti 采用 0A 级原料, Al 采用工业纯原料, Mn 为提纯锰, B 为 TiB₂, W 为 Al-W 中间合金加入。合金铸锭对应的化学成分分析结果如表 1 所示, 表中 425 为 Ti-42Al-5Mn 简写, 4250.1B 为 Ti-42Al-5Mn-0.1B 简写, 其余简写方法一致。

热物性参数分析试样取自切掉冒口的铸锭心部, 采用 DXF-200 热导仪和 FlashlineTM-5000 热物性分析仪进行测量。依据 GB/T22588-2008 标准测量系列合金 25 °C (室温) 至 800 °C 温度范围内的热扩散速率 (α)、热导率 (λ)。依据 GB/T 4339-2008 标准测量系列合金 25 °C (室温) 至 800 °C 温度范围内的热膨胀系数 (ε)。导热性能测试试样尺寸为 $\Phi 10$ mm \times 2 mm, 热膨胀系数测试样品尺寸为 6 mm \times 6 mm \times 50 mm, 端面平行度要小于 20 μ m, 粗糙度小于 1.6 μ m。每个温度点的热扩散率、热导率、热膨胀系数测试数据均为 3 次实测数据的平均值。

表 1 实验用 TiAl 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TiAl alloys (at%)

Alloy	Al	Mn	W	B	O*	Ti
425	41.7	4.91	-	-	0.076	Bal.
4250.1B	41.9	4.77	-	0.09	0.089	Bal.
4250.3B	41.7	4.74	-	0.28	0.073	Bal.
4250.5W	41.8	4.67	0.50	-	0.066	Bal.
4250.8W	41.5	4.88	0.77	-	0.061	Bal.
4251.0W	41.6	4.91	0.95	-	0.064	Bal.
4250.5W0.1B	41.9	4.79	0.50	0.09	0.069	Bal.

Note: O*-mass fraction, %

2 结果及分析

2.1 热导率和热扩散率

图 1 是 Ti-42Al-5Mn-(0~1.0)W-(0~0.3)B 合金室温 (约 25 °C) 至 800 °C 范围内的热导率 (λ) 和热扩散率 (α)。热导率 (又称导热系数) 和热扩散率属于材料的热输运性质参数, 热导率表示的是流体或物体与物体之间, 单位时间单位面积上的传热量; 而热扩散率指的则是物体内部热量扩散能力, 即物体内部温度趋向均匀的能力。在传热分析中, 热扩散率 (α , m²/s) 是热导率 (λ , W m⁻¹ K⁻¹) 与比热容 c 和密度 ρ 的乘积之比。可以看出, 对于含锰的 β 凝固 γ -TiAl 合金, 随着温度的升高, 合金的热导率和热扩散率均线性增加, 系列合金随着温度由室温升高至 800 °C, 热导率增加幅度达 9 W m⁻¹ K⁻¹, 而热扩散率增加幅度为 2.5 \times 10⁻⁶ m²/s。在 200 °C 以下, 合金的热导率增长速率稍低于 200~800 °C 对应的增长速率, 而合金的热扩散率则在室温至 800 °C 范围内几乎保持恒定的增长速率。对不同成分合金的热扩散率进行线性拟合, 拟合结果如表 2 所示。对比发现, Ti-42Al-5Mn 合金进行 W、B 微量合金化后, 同一温度下, 合金的热导率变化幅度约为 1 W m⁻¹ K⁻¹, 而热扩散率变化幅度仅约为 0.5 \times 10⁻⁶ m²/s。从热扩散率绝对数值可发现, W、B 添加对合金的影响并非一致。随着 W 含量由 0.0at% 提高至 1.0at%, 合金的热扩散率有降低的趋势, 相反随着 B 含量由 0.0at% 提高至 0.3at%, 合金的热扩散率有增加的趋势。

通常而言, 材料的热扩散性能主要由组织和化学成分决定^[13]。 β 凝固 γ -TiAl 合金组织通常由 α_2/γ 片层、片层团界面的 β_0 和 γ 相等组成^[11], 因此 TiAl 合金的导热性能与组织中各组成相的导热性能有密切关系。 γ -TiAl 合金中 γ (TiAl)、 α_2 (Ti₃Al) 室温对应的热导

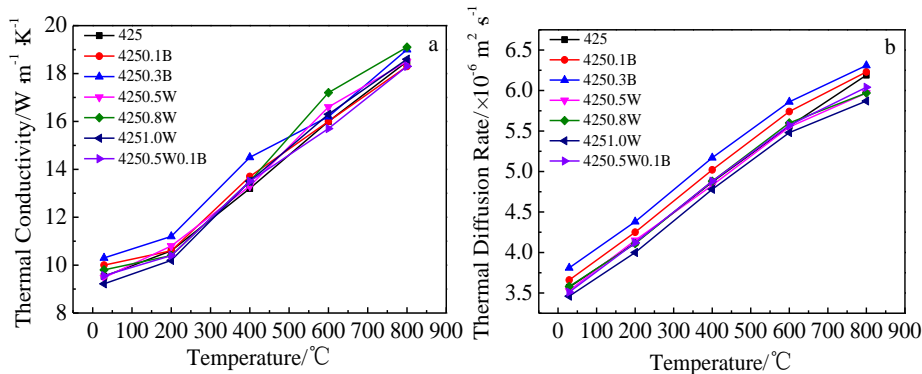


图 1 Ti-42Al-5Mn-(0~1.0)W-(0~0.3)B 合金室温至 800 °C 范围内的热导率和热扩散率

Fig.1 Thermal conductivity (a) and thermal diffusion rate (b) for Ti-42Al-5Mn-(0-1.0)W-(0-0.3)B alloys with the temperature increasing from room temperature to 800 °C

表 2 不同成分合金热扩散速率与温度的拟合结果

Table 2 Regression analysis results of thermal diffusion rate and temperature of alloys with different components

Alloy	$\alpha=f(T)$	Fitting temperature range/ $^{\circ}\text{C}$
425	$\alpha=3.44 \times 10^{-3}T+3.466\ 02$	25-800
4250.1B	$\alpha=3.41 \times 10^{-3}T+3.595\ 64$	25-800
4250.3B	$\alpha=3.33 \times 10^{-3}T+3.753\ 15$	25-800
4250.5W	$\alpha=3.23 \times 10^{-3}T+3.495\ 53$	25-800
4250.8W	$\alpha=3.23 \times 10^{-3}T+3.518\ 80$	25-800
4251.0W	$\alpha=3.24 \times 10^{-3}T+3.402\ 66$	25-800
4250.5W0.1B	$\alpha=3.35 \times 10^{-3}T+3.465\ 26$	25-800

率分别为 22 和 $7\ \text{W}\ \text{m}^{-1}\ \text{K}^{-1}$, 即 γ 相的导热能力约为 α_2 相的 3 倍^[14]。但是关于 β 凝固 γ -TiAl 合金中 β_0 相的导热性质尚未见相关报道。化学成分影响 TiAl 合金的导热性能主要是通过其加入量和存在形式影响合金的相组成方式来影响其导热性能的。对于 W 元素, 作者前期研究发现^[15], 随着 W 含量由 0.0at% 提高至 0.8at%, Ti-42Al-5Mn 合金中 γ 、 α_2 、 β_0 相体积分数分别由 63.2%、28.8%、6.3% 变为 75.0%、3.5%、19.5%。若只考虑相种类对合金导热性能的影响可以发现, 0.8at%W 添加后 γ (+11.8%) 和 α_2 (-25.3%) 相含量的变化均有利于改善合金的导热性能, 但事实上由图 1 的实验结果, 含 W 合金的导热能力稍低于不含 W 合金。分析发现, 0.8at%W 添加后合金中 β_0 相含量增加了 13.2at%, 该增加数值与 γ 相增加量相当, 约为 α_2 相降低量的一半。据此说明, W 添加降低合金导热性能与其增加组织中 β_0 相含量有关。结合本实验结果认为, 对于 $(\gamma+\alpha_2+\beta_0)$ 三相结构的 β 凝固 γ -TiAl 合金, β_0 相导热能力应最差, 即 $\gamma>\alpha_2>\beta_0$ 。而因 B 元素在 TiAl 合金中的固溶度极低, 即使微量 B 的添加也会在 TiAl 中以 TiB_2 等第二相形式存在^[16]。通常而言, TiB_2 晶体结构中的硼原子面和钛原子面交替出现构成二维网状结构, 其中的 B 与另外 3 个 B 以共价键相结合, 多余的一个电子形成大 π 键, 这种类似于石墨的硼原子层状结构和 Ti 外层电子决定了 TiB_2 具有良好的导热性^[17]。因此, 对于含 B 的 Ti-42Al-5Mn 合金导热性能改善与 B 在合金中形成的第二相粒子有关。

为了进一步说明 TiAl 合金成分和组织对其导热能力的影响, 本工作整理了目前所报道的 TiAl 合金热导率测试数据, 结果如图 2 所示, 图中 Ti-42Al-5Mn-

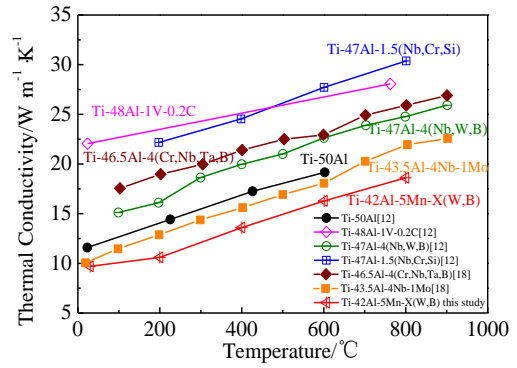


图 2 不同成分 TiAl 合金导热率对比结果

Fig.2 Thermal conductivity comparison of various TiAl-based alloys

X(W,B)合金对应的热导率为图 1a 中系列成分对应的热导率平均数值。容易发现, 不同成分的 γ -TiAl 合金热导率数值均随着温度的提高呈现线性增加的规律, 且不同 γ -TiAl 合金的热导率存在明显的差异。如在室温条件下, 图中所述合金的热导率最大差值可达 $12.5\ \text{W}\ \text{m}^{-1}\ \text{K}^{-1}$ 。另一方面, 也可发现, Al 含量较低的 β 凝固 γ -TiAl 合金 (TNM 和 Ti-42Al-5Mn-X(W,B)) 热导率普遍低于高 Al 含量的 γ -TiAl 合金。该对比结果进一步证明具有 $(\gamma+\alpha_2+\beta_0)$ 三相结构的 β 凝固 γ -TiAl 合金导热性能应弱于 $(\gamma+\alpha_2)$ 两相 γ -TiAl 合金。值得指出的是, 尽管 TiAl 合金中 γ 相的导热能力最强, 但对于具有 γ 单相结构的 Ti-50Al 合金的导热率仅高于 TNM 和 Ti-42Al-5Mn-X(W,B), 比 Al 含量较高的两相 γ -TiAl 合金导热能力差。这说明 TiAl 合金导热性能除与相组成有关外, 还与自身的合金化程度以及组织特征有关。

2.2 线热膨胀性

一般而言, 物体在一维方向上的膨胀特性用线膨胀系数来定量表述, 线膨胀系数分为微分线膨胀系数以及平均线膨胀系数^[19], 因为应用方便大多数的实际应用都采用平均线膨胀系数, 所以研究平均线膨胀系数的变化规律对实际应用具有重要的意义。线膨胀系数又名线弹性系数, 是固体物质的温度每改变 $1\ ^{\circ}\text{C}$ 时, 其长度的变化和它在原温度时长度的比值 (温度每变化 $1\ ^{\circ}\text{C}$ 材料长度变化的百分率)。图 3 是 Ti-42Al-5Mn-(0~1.0)W 合金室温 (约 $25\ ^{\circ}\text{C}$) 至 $800\ ^{\circ}\text{C}$ 范围内的线热膨胀率与平均线膨胀系数。可以看出, 随着温度的提高, Ti-42Al-5Mn-(0~1.0)W 合金线热膨胀率几乎处于同一水平 (图 3a)。对比不同 W 含量的合金平均线膨胀系数发现 (图 3b), 随着 W 含量的增加, 合金平均线膨胀系数稍有降低, 该降低的趋

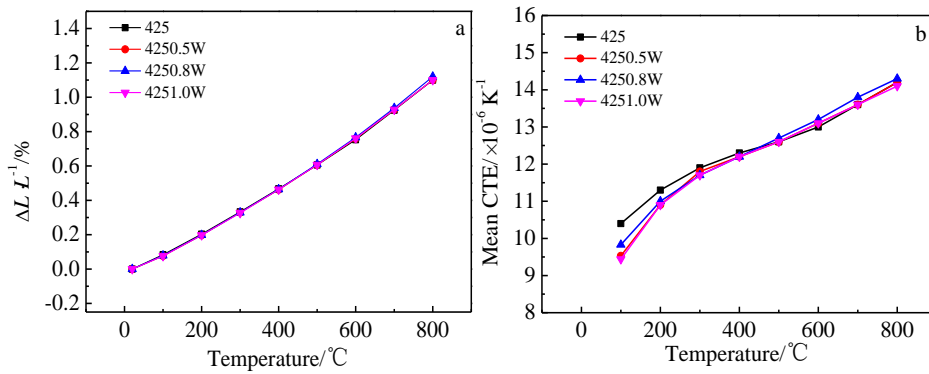


图 3 Ti-42Al-5Mn-(0~1.0)W 合金室温至 800 °C 范围内的线热膨胀量和平均线膨胀系数

Fig.3 Thermal expansion ($\Delta L/L$) (a) and mean coefficient of thermal expansion (CTE) (b) for Ti-42Al-5Mn-(0-1.0)W alloys with the temperature increasing from room temperature to 800 °C

势随着温度的提高逐渐变小。对不同成分合金 200~800 °C 温度范围内平均线膨胀系数进行线性拟合 (见表 3)。结果显示, 4 种成分的合金平均线膨胀系数与温度间的拟合结果近似相同。上述分析表明, W 对 Ti-42Al-5Mn 合金线热膨胀性影响较小, 在 100~300 °C 范围内, 随着 W 含量提高至 1.0at%, 合金的平均线膨胀系数稍有降低, 相反在更高温度时影响逐渐减小。

图 4 整理了目前所报道的 TiAl 合金的平均线膨胀系数对比结果, 图中 Ti-42Al-5Mn-(0~1.0)W 合金对应的热导率为图 3b 中系列成分对应的热导率平均数值。可以看出, 尽管本实验测试获得的 0.5at%~1.0at%W 添加对 Ti-42Al-5Mn 合金平均线膨胀系数影响较小, 但是横向对比发现不同成分 TiAl 体系的平均线膨胀系数差异仍相对较大, 表明 TiAl 合金主成分差异会影响合金的热膨胀性。对比发现, 在 100 °C 较低温度时, Ti-42Al-5Mn-(0~1.0)W 合金具有较低的平均线膨胀系数, 但是随着温度提升至 200 °C 后, 其平均线膨胀系数增加幅度高于图中其余合金。此外也发现, 具有单相 γ 结构的 Ti-50Al 合金具有最高的平均线膨胀系数, 随着 Nb、W 合金化程度的提高, TiAl

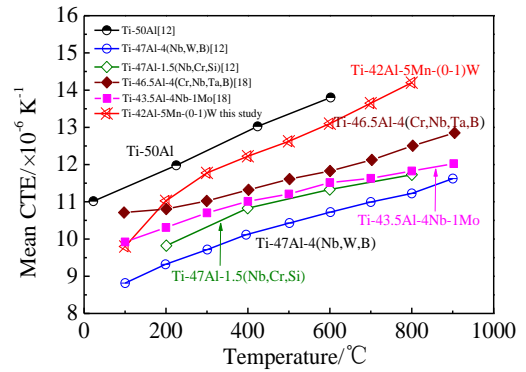


图 4 不同成分 TiAl 合金平均线膨胀系数对比结果

Fig. 4 Mean CTE comparison of various TiAl-based alloys

合金的平均线膨胀系数降低。

一般地, 材料的热膨胀系数主要受其熔点、相结构、化学键、磁性等因素影响^[20-22]。熔点越高的材料膨胀系数越小, 反之熔点越低的材料膨胀系数越大。而且有研究认为在靠近熔点时, 多数物质的膨胀系数并不能保持恒定, 而是随着温度的升高较快地增加^[23]。对于合金元素而言, 一般认为加入膨胀系数大的溶质元素时, 膨胀系数增加, 反之, 加入溶质元素的膨胀系数较小时, 材料的膨胀系数减小^[23]。表 4 是典型金属 20 °C 条件下对应的线热膨胀系数。容易发现, Al、Mn 的线膨胀系数约为 Ti 的 2 倍有余, 而 Nb、W、Cr、Mo 的线膨胀系数约为 Ti 的一半。由此可见, Ti-42Al-5Mn-(0~1.0)W 合金具有相对较高的线膨胀系数与其高含量的 Mn 有关, 尽管较低线膨胀系数的 W 加入会略微降低合金热膨胀性, 但是推测因为其添加量较低的原因并未明显降低 Ti-42Al-5Mn 合金的线膨胀系数。相反对于 Nb、W 合金化程度较高的 Ti-47Al-4(Nb,W,B)则具有

表 3 不同成分合金平均线热膨胀系数与温度的拟合结果

Table 3 Regression analysis results of mean CTE and temperature of alloys with different components

Alloy	$\varepsilon=f(T)$	Fitting temperature range/°C
425	$\varepsilon=0.004\ 96T+10.1$	100-800
4250.5W	$\varepsilon=0.006\ 01T+9.54$	100-800
4250.8W	$\varepsilon=0.005\ 99T+9.65$	100-800
4251.0W	$\varepsilon=0.006\ 04T+9.49$	100-800

表 4 典型金属 20 °C 条件下对应的线热膨胀系数

Table 4 Coefficient of thermal expansion of typical metals at 20 °C

Metal	Ti	Al	Nb	W	Mn	Cr	Mo	Ni	Fe
CTE/ $\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	10.8	23.2	7.8	4.6	23	6.2	5.2	13	12.2

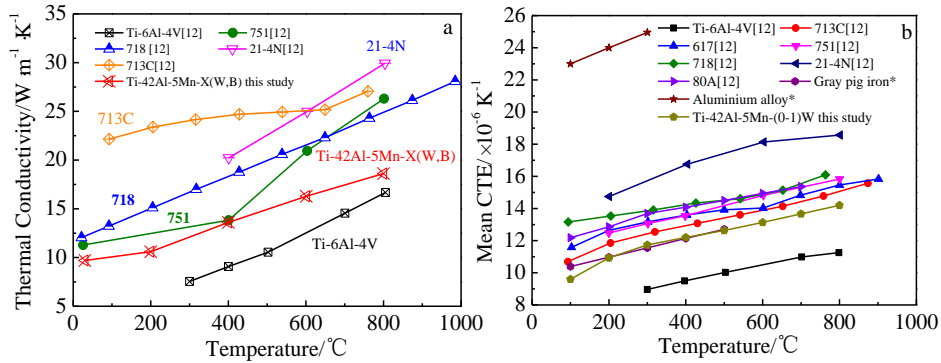


图 5 不同金属材料导热率和平均线膨胀系数对比

Fig.5 Thermal conductivity (a) and Mean CTE (b) comparison of various metal materials (* indicates that the noted data comes from <https://wenku.baidu.com/view/c22b80dda58da0116c17490e.html>)

较低的线膨胀系数。基于 Ti-Al 经典二元相图可以发现^[2], Al 含量在 40at%~50at% 范围, 随着 Al 含量的增加, γ -TiAl 合金熔点随之降低, 结合合金熔点对其热膨胀性质的影响可知^[23], Al 含量与合金的热膨胀性呈正比, 即 Al 含量越高合金的膨胀系数越大, 反之 Al 含量越低合金的膨胀系数则越小。但是对于 TiAl 合金最终的热膨胀性质还会与合金的元素添加种类有关。

2.3 含锰 β 凝固 γ -TiAl 合金导热和膨胀性与相关材料对比分析

轻质高强的 TiAl 合金通常被用以替换 Ni 基高温合金、耐热钢、高强钢等高温应用的材料, 以期实现航空、汽车发动机的减重, 提升航空发动机推重比, 以及利于汽车发动机的低碳、节能减排。通常而言, 对于往复运动的热端部件, 除了要求质轻外, 往往还需材料导热性能好、膨胀系数小^[10]。图 5 示出的是不同金属材料导热率和平均线膨胀系数对比结果。可以看出, 与 21-4N 耐热钢和 713C 等镍基高温合金相比, 密度较低的 Ti-6Al-V 和 Ti-42Al-5Mn-X(W,B) 合金导热性能相对较差, TiAl 合金的导热性能较 Ti-6Al-V 合金更优。尽管如此, 在 TiAl 部件应用时仍需对其相对较低的导热性进行特别关注。结合本工作获得的相、成分对 TiAl 合金导热性能的影响规律可知, 为提升 TiAl 合金的导热能力可从成分设计、热处理等角度调控出以导热能力良好的 γ 相为主的全片层

或近片层组织, 该类组织通常也具有良好的拉伸^[24]和蠕变性能^[25]。

由图 5b 可知, 与 Al 合金、21-4N 耐热钢和 713C 等镍基高温合金相比, Ti-6Al-V 和 Ti-42Al-5Mn-X(W,B) 等轻质合金具有更低的热膨胀系数, 因 Al 含量高, TiAl 合金的热膨胀系数会高于 Ti-6Al-4V, 但 TiAl 合金具有的更高承温能力是 Ti-6Al-4V 合金难以比拟的。较低的热膨胀系数为 TiAl 合金在热端部件的应用奠定了良好条件。比如, 对于活塞材料而言, 通常要求所用材料应满足热强度高、热膨胀系数小、比重小等特点, 而现役活塞材料以铝合金、铸铁、铸钢、陶瓷等为主^[26]。实践发现, 用铝合金制造的活塞尽管具有良好的导热性和质轻优势, 但它本身所固有的热强度不高、线膨胀系数较大的缺点随着活塞顶爆发压力的提高已不能满足发动机的可靠性要求, 致使其在柴油机上的使用受到明显的限制^[27]。而铸铁、铸钢活塞热膨胀系数较低, 且具有一定的热强度, 但仍存在比重大的应用难题^[26]。庆幸的是, TiAl 合金除了热强度较铝合金、铸铁、铸钢具有明显优势外, 其热膨胀系数还不足铝合金的一半, 且具有比重低的优势。因此, 用 TiAl 合金替换铝合金、铸铁、钢等现役活塞材料将具有明显的性能优势。但是对于金属间化合物的 TiAl 而言, 如何实现活塞结构的低成本制造将是将来科研工作者们需要重要突破的难题。

3 结 论

1) 随着 W 含量提高至 1.0at%, 合金的热扩散率稍有降低, 反之 B 含量提高至 0.3at%, 合金的热扩散率略有增加。W 添加降低合金导热性能与其增加组织中 β_0 相含量有关。对于 β 凝固 γ -TiAl 合金, γ 、 α_2 、 β_0 三相导热能力大小顺序应为 $\gamma > \alpha_2 > \beta_0$ 。B 提高合金的导热性能与 B 在合金中形成的含 B 第二相粒子有关。

2) W 对合金线热膨胀性影响较小, 在 100~300 °C 范围内, 随着 W 含量提高至 1.0at%, 合金的平均线膨胀系数稍有降低, 相反在更高温度时影响逐渐减小。

3) 具有较低的热膨胀系数的 TiAl 合金为其在航空、汽车发动机热端部件的应用奠定了良好条件, 尤其在现役以铝合金为主的活塞部件, TiAl 合金除了热强度较铝合金具有明显优势外, 其热膨胀系数还不足铝合金的一半, 且具有比重低的优势。

参考文献 References

- [1] Wang Mengguang(王孟光), Sun Jianke(孙建科), Chen Zhiqiang(陈志强). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2010, 27(4): 1
- [2] Yang Rui(杨锐). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2015, 51(2): 129
- [3] Clemens H, Wallgram W, Kremmer S *et al. Advanced Engineering Materials*[J], 2008, 10(8): 707
- [4] Xu Meng(徐萌), Zhang Shuzhi(张树志), Zhao Yu(赵宇) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(1): 183
- [5] Chen Guang(陈光), Chen Fengrui(陈奉锐), Qi Zhixiang(祁志祥) *et al. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*(振动、测试与诊断)[J], 2019, 39(5): 915.
- [6] Schloffer M, Rashkova B, Schöberl T *et al. Acta Materialia*[J], 2014, 64: 241
- [7] Zeng Shangwu, Zhao Aimin, Luo Lin *et al. Materials Letters*[J], 2017, 198: 31
- [8] Sun F S, Cao C X, Yan M G *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2001, 32: 1573
- [9] Chen Z, Jones I P, Small C J. *Scripta Materialia*[J], 1996, 35(1): 23
- [10] Luo Changzeng(罗长增), Li Hua(李华), Wei Tao(魏涛) *et al. Development and Application of Materials*(材料开发与应用)[J], 2021, 36(3): 50
- [11] Mayer S, Erdely P, Fischer F D *et al. Advanced Engineering Materials*[J], 2017, 19(4): 1 600 735
- [12] Zhang W J, Reddy B V, Deevi S C. *Scripta Materialia*[J], 2001, 45: 645
- [13] Jin Tong(金通), Yuan Fuan(袁福安), Kang Ming(康明) *et al. Auto Sci-Tech*(汽车科技)[J], 2021, 2: 66
- [14] Sauthoff G. *Landolt-Börnstein-Group VIII Advanced Materials and Technologies*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 14
- [15] Li Xiaobing, Tang Hongjian, Xing Weiwei *et al. Intermetallics*[J], 2021, 136: 107 230
- [16] Hu Dawei. *Rare Metals*[J], 2016, 35(1): 1
- [17] Li Liang(李靓), Wang Jianjiang(王建江), Li Junshou(李俊寿) *et al. Science Technology and Engineering*(科学技术与工程)[J], 2008(7): 34
- [18] Clemens H, Mayer S. *Advanced Engineering Materials*[J], 2013, 15(4): 191
- [19] Wang Qiankai(汪千凯). *Journal of Anhui Normal University, Natural Science*(安徽师范大学学报, 自然科学版)[J], 2018, 41(5): 440
- [20] Yu C Y, Lin K, Jiang S H *et al. Nat Commun*[J], 2021, 12(1): 4701
- [21] Song Y Z, Shi N K, Deng S Q *et al. Progress in Materials Science*[J], 2021, 121: 100 835
- [22] Yang Tao, Fan Longlong, Wang Yilin *et al. Int J Miner Metall Mater*[J], 2022, 29(4): 783
- [23] Hua Ying(华瑛). *Journal of Shanghai Iron & Steel Research*(上海钢研)[J], 2005, 2: 60
- [24] Schwaighofer E, Clemens H, Mayer S *et al. Intermetallics*[J], 2014, 44: 128
- [25] Kasthuber M, Klein T, Clemens H *et al. Intermetallics*[J], 2018, 97: 27
- [26] Guo Lingjun(郭领军), Li Hejun(李贺军), Shi Zhenhai(石振海). *Foundry*(铸造)[J], 2003, 52(9): 657
- [27] Lv Liangkai(吕良恺), Su Tiexiong(苏铁熊), Yang Qi(杨琪). *Automobile Parts*(汽车零部件)[J], 2012, 1: 71

Effect of W and B on the Thermo-physical Properties of Ti-42Al-5Mn Alloys

Li Xiaobing¹, Shu Lei¹, Qian Kun¹, Chen Bo¹, Liu Kui, Lin Kun²

(1. Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, China)

(2. Institute of Solid State Chemistry, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The thermal conductivity and expansion properties of materials are important factors affecting their application. The effects of W, B addition on the thermo-physical properties such as thermal diffusion rate, thermal conductivity and thermal expansion of Ti-42Al-5Mn alloy (at%, the same below) with low cost and good hotworkability were systematically studied. The results show that with the increase of W content to 1.0at%, the thermal diffusivity of the alloy decreases slightly. On the contrary, after the B content increases to 0.3at%, that of the alloy increases slightly. The promotion of β_0 phase in microstructure by W addition is the main reason for decreasing the thermal conductivity of the alloy. It is observed that these phases in β -solidifying γ -TiAl alloys are followed by γ , α_2 , and β_0 in decreasing order of thermal conductivity. On the other hand, B improving the thermal conductivity of the alloy might be related to the B-containing precipitates in the alloy. W addition (0.5at%-1.0at%) has little effect on the average linear expansion coefficient of Ti-42Al-5Mn alloy. In the range of 100-300 °C, with W content increasing to 1.0at%, the average linear expansion coefficient of the alloy decreases slightly. On the contrary, the influence decreases gradually at higher temperature. The thermal expansion coefficient of TiAl alloy is equivalent to that of cast iron, and lower than that of steel, nickel base superalloy and other materials. It would have certain application value in components requiring very low thermal expansion coefficient such as piston.

Key words: β -solidifying γ -TiAl; wrought; thermo-physical properties; Mn; W

Corresponding author: Chen Bo, Ph. D., Professor, Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, P. R. China, E-mail: chenbo@jihualab.ac.cn