

# 合金元素对典型阻燃钛合金燃烧行为的影响

陈永楠<sup>1</sup>, 杨雯清<sup>1</sup>, 杨泽慧<sup>1</sup>, 张凤英<sup>1</sup>, 赵永庆<sup>2</sup>

(1. 长安大学, 陕西 西安 710064)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 阻燃钛合金是飞机发动机核心部件中的重要材料, 由于钛合金燃烧过程难以控制, 燃烧参数难以获得加大了研究难度。以典型阻燃钛合金 Ti40 和 Ti14 为研究对象, 利用高速摄影在不同氧分压环境下通过直流点火研究其燃烧行为, 探索其燃烧过程中的氧扩散过程, 明确合金元素对阻燃行为的影响。研究发现, 2 种合金燃烧后均形成分层结构, Ti40 合金中 Cr 和 V 元素向外扩散, 和氧反应生成  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{V}_2\text{O}_5$ , 密度高于  $\text{TiO}_2$  的密度, Ti 原子很难通过  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  向外扩散与氧反应, 提高燃烧表面致密度, 抑制氧的扩散; 而对于 Ti14 合金, 共析反应生成大量的液相, 富 Cu 相包裹 Ti 相球化晶粒形成 Cu 元素富集层, 隔离氧并减少钛与氧的接触, 从而降低氧向基体的扩散速率, 同时 Cu 相的包裹作用增加氧扩散的距离, 氧需要更多的能量扩散与 Ti 接触并反应, 从而抑制了反应的发生。

**关键词:** 阻燃钛合金; 燃烧特征; 半固态锻造; 阻燃机理

**中图分类号:** TG146.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2019)11-3608-07

钛合金是重要的轻质金属发动机材料, 其重要位置在短期内不可替代, 为了满足使用的需要并扩大其应用范围, 提高钛合金的使用安全性和降低发生燃烧事故的可能性, 需要对钛合金的燃烧行为和阻燃性能进行研究<sup>[1,2]</sup>。从化学反应角度认为, 钛合金燃烧的本质为氧化反应, 只是发生的剧烈程度不同, 钛合金会生成一系列从低价到高价态的氧化物, 并且密度随之逐渐下降<sup>[3]</sup>。在点燃钛合金的升温过程中, 表面的氧化膜的密度升高, 对氧气具有一定的阻挡性, 但是随着温度的升高氧在钛中的溶解度升高, 例如, 氧的溶解度在 1200 °C 左右时可以达到 36% (原子分数), 氧化物中的氧含量降低产生了缺氧环境, 氧化反应变成还原反应, 氧化膜密度降低, 不平衡过程使氧化膜开裂甚至脱落, 为钛合金的燃烧反应提供了更多的氧气并且接触面积增大, 提供的热量多于损失的热量, 促进温度的升高, 从而达到点燃温度并发生燃烧<sup>[4]</sup>。因此, 为了研究钛合金的燃烧过程, 结合燃烧过程特征, 通过燃烧产物分析来为钛合金的燃烧和阻燃行为的分析提供参考。

目前, 国内常用的阻燃钛合金为 Ti40(Ti-25V-15Cr-0.2Si)合金和 Ti14(Ti-13Cu-0.3Al-0.7Si)合金, 针对此 2 种合金阻燃特性国内外开展了大量的研

究, 赵永庆<sup>[5]</sup>, 赖运金<sup>[6]</sup>和 Chen<sup>[7]</sup>分别采用滴定法和直流点火法研究了 Ti40 和 Ti14 合金的阻燃特性, 研究发现其燃烧过程与合金元素、测定方法及服役环境具有重要的影响。弭光宝<sup>[8,9]</sup>采用摩擦燃烧法研究了 Ti40 合金在不同氧分压条件下的燃烧行为, 并发现燃烧过程是典型的剧烈氧化过程, 氧分压是影响燃烧过程的重要因素。目前, 对于这 2 种阻燃合金的研究主要针对于阻燃性能测定方法及性能评定, 而同种条件下研究合金元素在燃烧过程中的作用和机理, 特别是氧分压的影响, 尚未进行详尽报道。因此, 本研究采用直流点火法通过不同的氧分压研究了 Ti40 和 Ti14 两类阻燃钛合金燃烧行为, 分析燃烧特征, 采用微区 XRD 对不同燃烧区产物特征进行分析; 利用不同氧分压下氧在合金燃烧过程中的扩散过程, 揭示不同元素的阻燃作用。该研究有利于设计优化阻燃钛合金合金成分, 提高阻燃性能并扩大阻燃钛合金的应用范围。

## 1 实验

以典型 Ti-Cu 系和 Ti-V-Cr 系铸态合金为研究对象, 并选用铸态钛合金 Ti-6Al-4V 合金作对比试验, 由西北有色金属研究院提供合金分别为 Ti14 合金

收稿日期: 2018-11-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0700301, 2016YFB1100103); 国家自然科学基金 (51471136); 陕西省博士后项目 (2017BSHYDZZ01); 中央高校项目(300102318205, 300102318206, 300102318209)

作者简介: 陈永楠, 男, 1981 年生, 博士, 教授, 长安大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710064, 电话: 029-82337343, E-mail: frank\_cyn@163.com

(Ti-13Cu-0.3Al-0.7Si) 和 Ti40 合金 (Ti-25V-15Cr-0.2Si)。其中 Ti-14 合金室温组织为  $\alpha$ +Ti<sub>2</sub>Cu<sup>[7]</sup>, Ti40 合金室温组织为  $\beta$  相, 晶粒较大并且晶界明显<sup>[5]</sup>。

采用改进的直流点燃法(direct current simulation burning, DCSB)进行燃烧实验<sup>[7]</sup>。点燃试样尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的块状, 同时采用混合气体 (O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>) 控制器来研究氧气含量对燃烧行为的影响, 氧分压控制在 20%~100%之间并通过气体供给系统 (Parker F65) 控制流速为 15 m/s。在燃烧试样中间放置热电偶测量温度, 每种合金测 5 次取平均值得到燃烧过程中温度变化趋势。同时, 高速摄影机 (Pco 1200 hs, PCO Company, Berlin, Germany) 记录燃烧过程并提供燃烧特征参数, 如燃烧时间、燃烧速率以及火焰高度, 图像的帧间隔和曝光时间分别为 500 和 10  $\mu$ s, 每张图片的分辨率为 768×768 像素。燃烧过程中, 在燃烧试样和镜头之间放置中性密度滤光片避免光饱和和度过高, 燃烧装置如图 1 所示。

为了控制保证燃烧条件相同, 通过调节氧分压确保相同的氧含量(C<sub>0</sub>), 并分析在不同的氧含量下 2 种合金的燃烧行为。金属燃烧过程中通常伴随一系列的燃烧现象, 通过选择 3 个明显特征来表征燃烧过程: 燃烧持续时间、燃烧速率和火焰的剧烈程度。根据燃烧试样的质量变化估计燃烧速率<sup>[10]</sup>:

$$v_b = \frac{\Delta m_s}{t_b} \quad (1)$$

式中,  $\Delta m_s$  为燃烧后试样的增重,  $t_b$  为燃烧持续时间。为了保证表征的可靠性, 每个试样的燃烧试验重复 5 次并记录相关数据。

采用冷发射扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM, HitachiS-4800)和电子背散射衍射 (electron backscattered diffraction, EBSD) 观察燃烧后产物形貌。采用装备有平行点聚焦入射束 (CBO-f optic) 的 Rigaku Smart Lab 微区 X 射线衍射 (X-ray Diffraction, XRD) 仪对燃烧产物进行定性分析, 扫描速率 1.5°/min, 步长 0.02°, 2 $\theta$  范围 20°~80°。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Ti14 和 Ti40 合金燃烧行为分析

图 2 为 2 种阻燃合金和 TC4 合金从空气状态 (C<sub>0</sub>=20%)到纯氧环境下(C<sub>0</sub>=100%)的燃烧时间和燃烧速率。3 种合金的燃烧时间和燃烧速率在空气状态下差别较大, 随着氧含量的增加, 燃烧时间和燃烧速率增加, 但是 Ti14 和 Ti40 之间的差别缩小。这种变化趋势与 Shafirovich<sup>[11]</sup> 和 Molodetsky<sup>[12]</sup> 的研究结果相似, 燃烧气氛中 O<sub>2</sub> 含量的变化能够明显的影响燃烧过

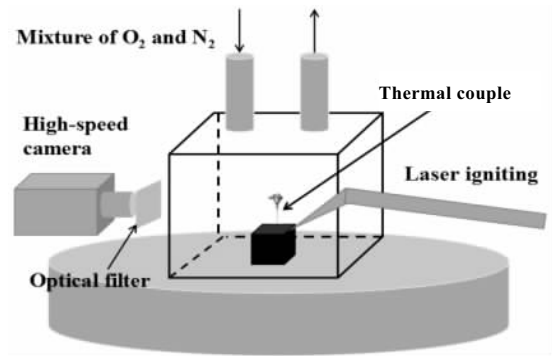


图 1 燃烧装置示意图

Fig.1 Schematic drawing of the burning test

程。虽然 Ti40 合金与 Ti14 合金相比表现出更好的阻燃性, 但是这种差距在纯氧条件下极小, 足够的氧气含量促进充分燃烧, 并且其他因素的影响减小。TC4 合金作为对比实验, 空气状态下燃烧速率为 7 mg/s, 而 Ti14 合金仅为 5.5 mg/s。

从点燃到燃烧, 试样表面产生明显的可见火焰如图 3 所示。为了研究火焰特征, 通过高速摄影机拍摄的照片记录火焰高度的变化, 燃烧环境为空气状态下即氧含量为 20%, 随着燃烧时间的增加火焰高度逐渐增加, Ti14、Ti40 和 TC4 合金的燃烧火焰分别第 3、2.5 和 3.5 s 分别达到最高值 11.5、10 和 16 mm。在燃烧相同时间后, TC4 合金的火焰光斑与 Ti14 和 Ti40 合金相比明显, 同时, Ti14 合金和 Ti40 合金在燃烧 5.5 和 4 s 后燃烧停止, 而 TC4 合金则持续燃烧了 7 s 停止燃烧后。根据燃烧时间、燃烧速率和火焰高度值, 可以看出与常规 TC4 合金相比, 虽然 Ti40 具有更好的阻燃性, 但是 Cu 元素的加入也能使钛合金表现出一定阻燃性。

### 2.2 Ti14 和 Ti40 合金燃烧产物分析

前期研究中发现 2 种阻燃合金燃烧后结构为燃烧表层、产物区和界面<sup>[6,7,9]</sup>。为了确定各层产物组成和合金元素的作用, 采用微区 XRD 对燃烧表面和燃烧界面产物进行分析, XRD 扫描区域从直径约 2 mm 的圆形区域收集来表示局部区域的相组成, 分别从区域 I 和区域 II 接近燃烧表面和原始材料部分进行检测, 其结果如图 4 所示。其中, Ti40 合金燃烧表面的燃烧产物主要为金红石型 TiO<sub>2</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和少量的 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (图 4a, 4d), 但是这些氧化物只发现在接近燃烧表面的 I 区域, 靠近基体的 II 区域并没有发现氧化物, 主要是基体 Ti, 说明扩散进基体内的氧含量较少。图 4b 和 4e 为 Ti14 合金的燃烧产物和靠近基体的产物, 相同的, 燃烧表面主要为金红石型 TiO<sub>2</sub>, 此外, Ti14 合金具有

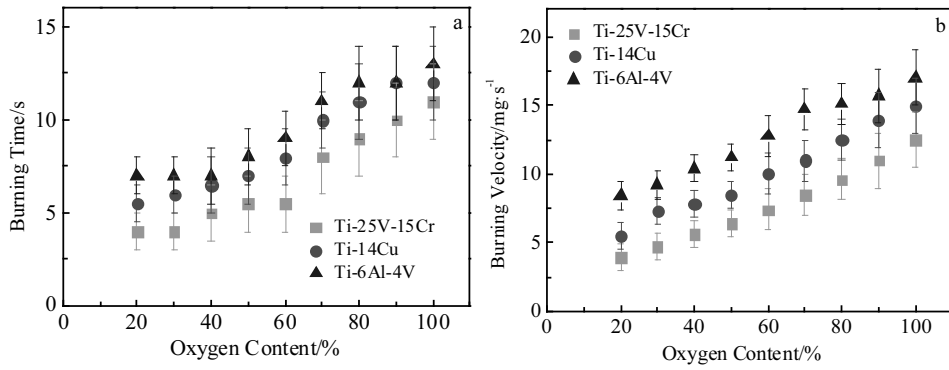


图 2 不同氧分压下 3 种合金的燃烧时间和燃烧速率

Fig.2 Burning time (a) and burning velocity (b) of the alloys under different oxygen partial pressures

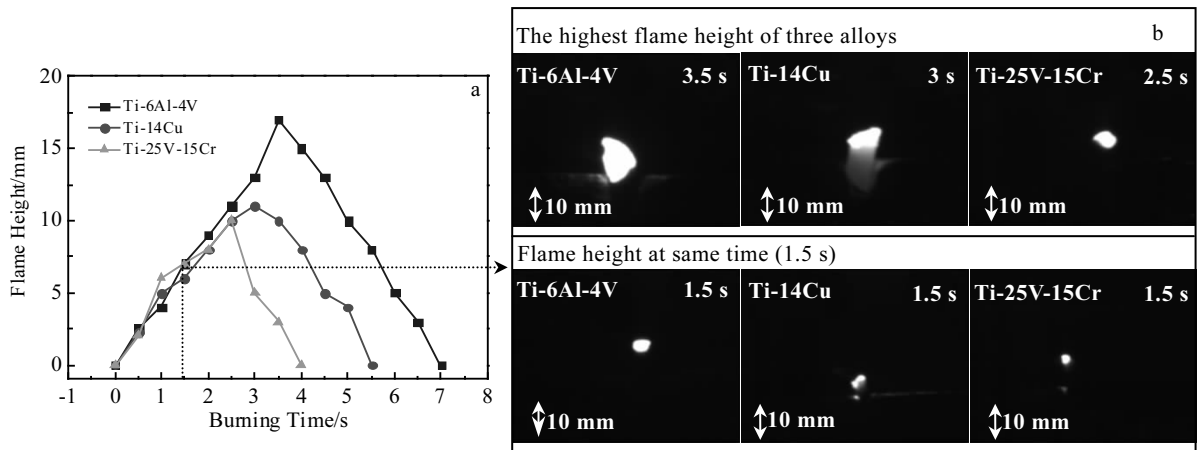


图 3 空气条件下( $C_o=20\%$ ) 3 种合金的火焰高度变化趋势及在火焰高度最高点和相同燃烧时间后 3 种合金的火焰图

Fig.3 Flame height (a) and captured images (b) of the alloys burning after different time ( $C_o=20\%$ )

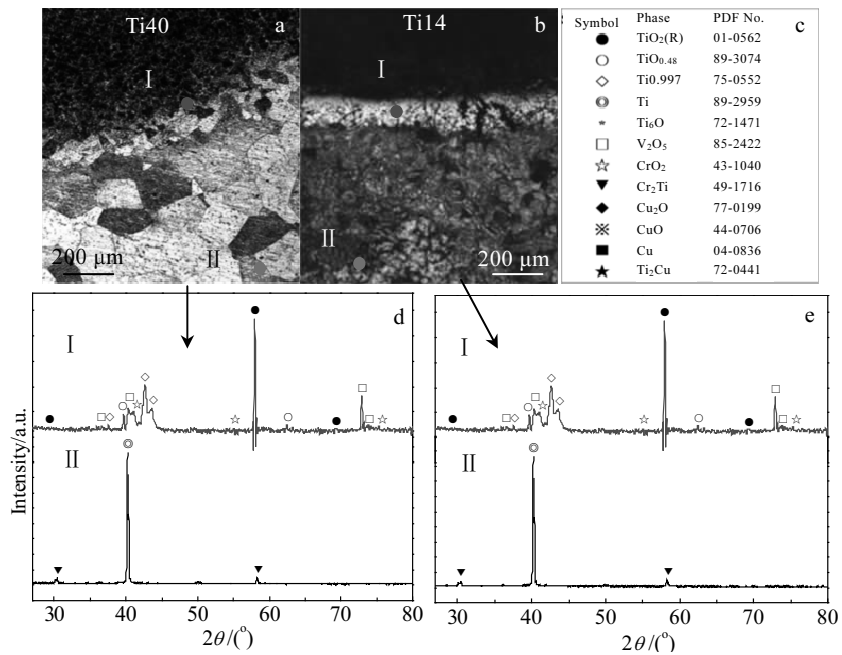


图 4 Ti40 和 Ti14 合金燃烧区和基体微观组织及燃烧后界面微区的 XRD 图谱

Fig.4 Burned cross-section optical microscopic images of Ti40 and Ti14 alloy ( $C_o=20\%$ ) (a, b); PDF No.(c) and the corresponding micro-area XRD patterns taken from area I and II in Fig.4a and Fig.4b (d, e)

不同的燃烧产物,在 I 区域,除了有  $\text{TiO}_2$ , 还有 Cu 的氧化产物和 Ti-Cu 相, 并且  $\text{Ti}_2\text{Cu}$  是燃烧产物的重要组成部分。在接近基体的 II 区域发现有 Cu 相和  $\text{Ti}_2\text{Cu}$  相。基于对 Ti14 合金的氧化分析, 氧化后合金内的晶界宽化,  $\text{Ti}_2\text{Cu}$  相沿晶界发生液相偏析, 燃烧后合金靠近基体处也发生类似现象。虽然燃烧气氛中含有  $\text{N}_2$ , 但是在燃烧产物中并没有发现 TiN 相, 这是由于温度的升高和氧气的扩散, TiN 相和氧气的继续反应会氧化生成  $\text{TiO}_2$ <sup>[13]</sup>。

由于 Ti40 合金的燃烧产物区较大, 难以完整的出现在同一视野中, 因此将燃烧产物分为外表层和内表层。图 5a 显示了燃烧产物内表层即为图 5 中的 I 区域, 该区域表面较为疏松, 并有颗粒状物质分布在表面, 部分位置集中并连接成片提高区域 I 局部致密度。通过对这些物质进行成分分析, 发现其主要由 Ti、V、O 3 种元素组成并且含量分别为 78.62%、5.72%、15.66%(质量分数), 但在其中未发现 Cr 元素。在氧化物中发现具有层状结构, 而 V 的氧化物具有特殊的层状结构, 结合燃烧产物 XRD 分析结果, 可以推测这些颗粒状物质主要为  $\text{TiO}_2$  和  $\text{V}_2\text{O}_5$ , 其中 Ti 的氧化物含量更高。在燃烧产物区的外表层(图 5b), 发现其由明暗 2 种相组成, 表面无明显的疏松多孔结构, 并且部分圆形暗相连接成片状, 该区域有燃烧产物  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{V}_2\text{O}_5$ , 在该区域氧化物所占的面积达到了 83%, 而在燃烧内表层中氧化物所占的面积约为 14%, 氧化表面的比例降低, 进入合金内的 O 元素的含量降低, 但是 V 和 Cr 元素在燃烧产物区从燃烧外层至氧化内层的含量均增加。

Ti14 合金燃烧区结构与 Ti40 合金燃烧区结构相似(如图 6), 由 I 区域表面产物区(burned product zone, BPZ)、II 区域热影响区(heat affected zone, HAZ)、III 基体组成。Ti14 合金燃烧表面不平整, 并存在颗粒状

产物, 无裂纹的出现。燃烧产物区较小, 经 EDS 能谱测试燃烧产物 I 区主要为 Ti 和 O 元素, Cu 元素含量较低。在热影响过渡 II 区能发现针状物, 有偏析现象, 经 EDS 能谱测试 II 区的 O 含量与燃烧产物区相比较低, 并且白色的偏析相中 Cu 元素含量较高。在 II 区域与燃烧产物区交界处发现 Ti 元素含量较低, 但是 Cu 含量有明显的升高, 形成 Cu 富集区。由图 6d 可以看出 Cu 富集层颗粒与燃烧产物区的颗粒相比较小, 出现絮状物, 并且在 Cu 富集层下部氧含量迅速降低, 说明 Cu 富集层对氧的扩散有一定阻挡作用。

综上所述, I 燃烧产物和熔化区: 该区域在 Ti40 合金光滑致密, 无可见裂纹和孔洞; Ti14 合金的燃烧产物呈颗粒状, Cu 的氧化物填充在  $\text{TiO}_2$  粒子间隙中提高表面致密度<sup>[14,15]</sup>。II 热影响区: Ti40 合金热影响区较大, 由于在燃烧过程中受到燃烧热以及温度梯度的影响, 合金晶粒组织较粗大; Ti14 合金的该区域较宽, 且从组织形态看, 在 II 区域前半部分呈等轴的  $\alpha$  组织, 在该区域后半部分呈柱状  $\alpha$  组织, 说明受氧元素影响较明显, 此外由于受到燃烧热的影响, 出现偏析相, Cu 相沿晶界偏析形成 Cu 富集层来影响 O 元素的扩散过程。

通过不同区域合金元素分布的对比分析可知, Ti40 合金在经过燃烧产物区后, 氧含量有一定的降低, 这和所观察到的该区致密的组织形貌有关, 说明致密的燃烧界面对阻挡氧气进入有一定作用。II 过渡区的 V、Cr 元素的含量迅速升高, 出现成分偏聚形成元素的富集, 从燃烧表面向基体内部扩散的 O 含量经过此富集区域迅速降低, 说明其对氧的扩散有一定抑制作用, 并且通过微区 XRD 结果分析, 此区域的氧化物的量与靠近燃烧表面的位置相比较少; 其次, 从燃烧区结构和组织来看, Ti40 合金的影响区受到了燃烧热的影响, 而受到氧元素扩散的影响较小。而 Ti14 合金

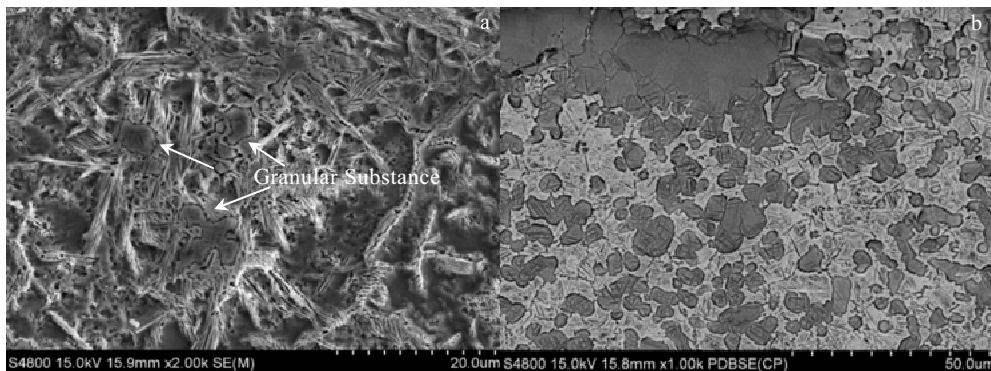


图 5 Ti40 合金燃烧后燃烧产物区 I 微观组织

Fig.5 Microstructures of area I for Ti40 near surface (a) and burned surface (b)

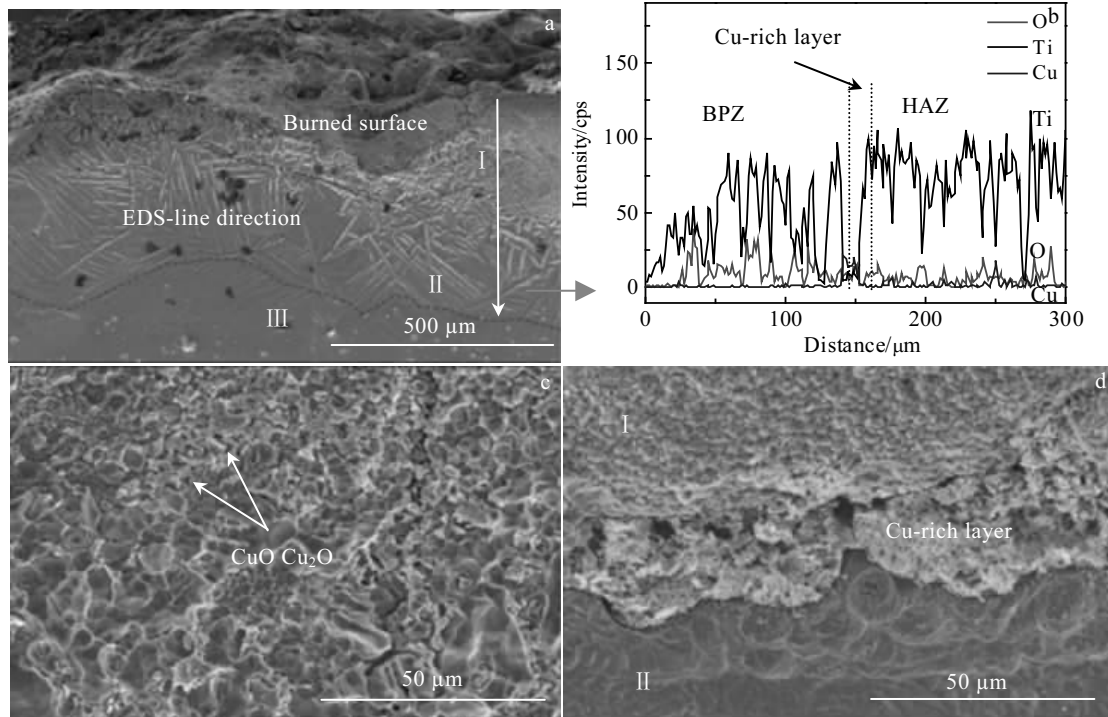


图 6 Ti14 合金燃烧后剖面微观组织、燃烧组织对应 EDS 元素线扫描、Ti14 合金燃烧后燃烧产物区 I 区域的组织形貌及 Ti14 合金燃烧后形成的 Cu 富集层

Fig.6 Cross-section microstructure of Ti14 after burning (a); corresponding EDS element line scanning (b); magnified burning products (c); Cu-rich layer (d)

则从燃烧表面到基体的元素分布出现了一个区域 Cu 元素含量的迅速升高,但在此区域的 Ti 元素含量较少。在 I 燃烧产物熔化区氧含量比较高,经过 Cu 富集层后氧含量迅速降低,Cu 元素含量也恢复至基本接近 Ti14 合金的名义成分。

### 2.3 合金元素作用机理及燃烧模型

根据上述的讨论、微观组织和 Cu、V、Cr 元素的阻燃作用,可以建立如下阻燃模型,如图 7 所示。燃烧开始阶段,主要驱动力是合金的氧化反应,随着燃烧的进行,主要依靠氧的扩散。与半径大的粒子相比,半径较小的粒子更容易扩散。Ti、V、Cr 的离子半径分别是 132、122、118 pm,其扩散速率应满足  $Ti < V < Cr$ <sup>[16]</sup>。燃烧氧化过程中,Cr 离子由基体向外扩散,使热影响区 Cr 含量升高,如图 5 所示 Cr 元素主要分布在氧化产物之下的热影响区。同时 Cr 和 V 元素向外扩散的过程中,和氧反应生成  $Cr_2O_3/V_2O_5$ 、 $Cr_2O_3$  的密度为  $4.89 \text{ g/cm}^3$ ,高于  $TiO_2$  的密度 ( $3.62 \text{ g/cm}^3$ ),Ti 离子很难通过  $Cr_2O_3$  向外扩散与氧反应<sup>[17]</sup>,这种结构能够提高燃烧表面致密度,从而有利于抑制氧的扩散,对燃烧行为产生影响,燃烧速率低、燃烧时间短并且火焰高度低,表

现出良好的阻燃性。此外,在燃烧过程中  $V_2O_5$  的熔点为  $690 \text{ }^\circ\text{C}$ ,燃烧的升温过程,推测  $V_2O_5$  燃烧过程中可能蒸发带走一部分热量。

2 种阻燃合金的燃烧产物都主要是  $TiO_2$ ,合金元素向外扩散,氧气向内扩散。根据菲克第一定律,合金中氧的扩散满足<sup>[18]</sup>:

$$J = C' \frac{d\xi}{d\tau} = \frac{C'}{\rho} \cdot \frac{dm}{d\tau} \quad (2)$$

式中, $J$ 为合金中氧的扩散通量, $C'$ 是其他合金元素相和 Ti 相之间的氧浓度, $\frac{d\xi}{d\tau}$ 为氧浓度, $\rho$ 是燃烧

后氧化物的密度, $\frac{dm}{d\tau}$ 为氧化增重速率满足以下公式<sup>[18]</sup>:

$$\frac{dm}{d\tau} = \frac{K}{2m} = \frac{K}{2\rho\xi} \quad (3)$$

式中, $K$ 是稳定燃烧的氧化速率,结合公式(2)和(3)可以得到:

$$D \frac{C_1 - C_2}{\xi} = \frac{C'}{\rho} \cdot \frac{K}{2\rho\xi} \quad (5)$$

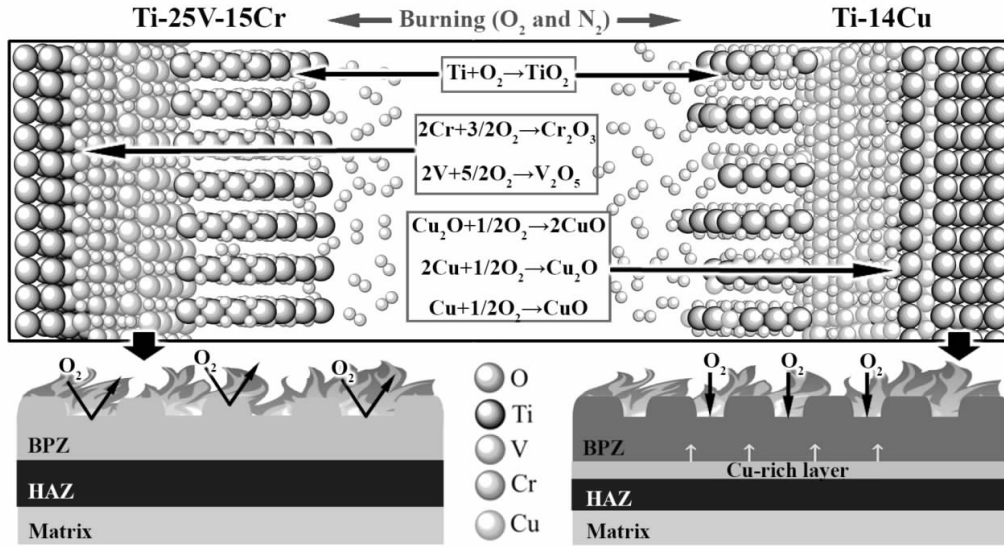


图 7 Ti40 和 Ti14 合金的阻燃机制

Fig.7 Burn resistant mechanisms of Ti40 and Ti14 alloys

$$D = \frac{C'K}{2\rho^2(C_1 - C_2)} \quad (6)$$

通过公式 (6) 可以发现扩散速率  $D$  的变化规律,  $C'$ ,  $C_1$  和  $C_2$  的值在稳态后稳定。公式 (6) 反映了氧的扩散系数和氧化速率  $K$  之间的关系, 当氧化速率  $K$  降低, 扩散速率  $D$  降低, 因为燃烧是快速的氧化过程, Ti40 和 Ti14 的氧化速率与常规钛合金 TC4 合金相比要低<sup>[5,8]</sup>, 可以得出氧的扩散速率在这 2 种合金中较低。

对 Ti14 合金, 形成的 Cu 富集层抑制氧的进入, 富 Cu 相包裹 Ti 相, 隔离氧从而降低与氧的接触, 降低氧的扩散速率, 从而表现出阻燃性能。此外, Cu 元素消耗氧气生成 CuO 和 Cu<sub>2</sub>O, 并填充在 TiO<sub>2</sub> 粒子间隙中降低氧气的含量且提高产物致密度。燃烧过程中 Cu 和氧气反应生成 Cu 的氧化物, 消耗了与 Ti 反应的氧气, 因此 Ti14 合金的氧化速率与 Ti40 合金相比较, 但是 CuO 和 Cu<sub>2</sub>O 的熔点分别为 1065 和 1235 °C<sup>[19]</sup>, 在高温下发生蒸发使燃烧表面的 Cu 元素含量较低 (如图 7)。

从自由能角度解释, 根据 Van't Hoff<sup>[20]</sup>公式:

$$\Delta G = \Delta G^\theta - RT \ln P_{O_2} \quad (7)$$

式中,  $\Delta G^\theta$  是标准吉布斯自由能,  $R$  是常数,  $T$  是温度,  $P_{O_2}$  是氧含量, Ti14 合金中出现的球化组织, 富 Cu 相保护了 Ti 相, 富 Cu 相的包裹作用增加氧扩散的距离, 氧需要更多的能量扩散与 Ti 接触并反应, 从而抑制了反应的发生。Cu 富集区氧含量低。当氧含量低至临界值, 出现  $\Delta G > 0$ , 抑制了氧化反应, 从而实现阻燃性能。此外, Ti<sub>2</sub>Cu 相在燃烧前会熔化, 这在一定程度

上降低了表面的温度; 另一方面, 在高速摩擦条件下, 燃烧前的软化起到润滑效果, 避免了刚性摩擦, 降低了“钛火”发生的可能。

### 3 结论

1) Ti14 合金与 TC4 合金相比, 燃烧维持时间较短, 燃烧速率低, 分别为 5.5 和 7 mg/s, 作为高性价比的 Cu 元素能够满足基本的阻燃要求。

2) Ti40 合金中 Cr 和 V 元素向外扩散, 和氧反应生成 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 密度高于 TiO<sub>2</sub> 的密度, Ti 离子很难通过 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 向外扩散与氧反应, 提高燃烧表面致密度, 抑制氧的扩散, 从而对燃烧行为产生影响, 燃烧速率低、燃烧时间短并且火焰高度低, 表现出良好的阻燃性。

3) Ti14 合金发生液相偏析和 Cu 元素的富集, 晶界为 Cu 元素的富集提供更多通道, 富 Cu 相包裹 Ti 相球化晶粒, 增加氧扩散的距离, 隔离氧从而降低钛与氧的接触, 并降低氧向基体的扩散速率。Cu 元素消耗氧气生成 CuO 和 Cu<sub>2</sub>O, 并填充在 TiO<sub>2</sub> 粒子间隙中降低氧气的含量且提高产物致密度, 从而抑制了反应的发生。

### 参考文献 References

[1] Chen Y N, Luo C, Wei J F *et al.* *Mechanics of Time-Dependent Materials*[J], 2015, 19(3): 325  
 [2] Du W, Zhang S, Luo X *et al.* *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2017, 723: 729  
 [3] Zhang G, Zhang P, Huang G *et al.* *Rare Metal Materials and*

- Engineering*[J], 2011, 40(S3): 286
- [4] Aly Y, Dreizin E L. *Combustion & Flame*[J], 2015, 162(4): 1440
- [5] Zhao Yongqing(赵永庆), Ge Peng(葛鹏). *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2014, 34(4): 51
- [6] Lai Yunjin(赖运金), Zhang Pingxiang(张平祥). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(8): 2067
- [7] Chen Y N, Huo Y Z, Song X D *et al. International Journal of Minerals Metallurgy & Materials*[J], 2016, 23(2): 215
- [8] Mi Guangbao(弭光宝), Cao Chunxiao(曹春晓), Huang Xu(黄旭) *et al. Material Engineering*(材料工程)[J], 2016, 44(1): 1
- [9] Mi Guangbao(弭光宝), Huang Xu(黄旭), Cao Jingxia(曹京霞). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2014, 50(5): 575
- [10] Rosa R, Veronesi P, Casagrande A *et al. Journal of Alloys & Compounds*[J], 2016, 657: 59
- [11] Shafirovich E, Teoh S K, Varma A. *Combustion & Flame*[J], 2008, 152(1-2): 262
- [12] Molodetsky I E, Vicenzi E P, Dreizin E L *et al. Combustion & Flame*[J], 1998, 112(4): 522
- [13] Mukasyan A S, Vadchenko S G, Khomenko I O. *Combustion & Flame*[J], 1997, 111(1-2): 65
- [14] Hayama A O F, Andrade P N, Cremasco A *et al. Materials & Design*[J], 2014, 55(2): 1006
- [15] Wang W, Huang R, Zhao Y *et al. Journal of Alloys & Compounds*[J], 2018, 740(5): 47
- [16] Guerrero S E, Dreizin E L, Shafirovich E. *Combustion & Flame* [J], 2016, 164: 164
- [17] Yang Y, Kitashima T, Hara Y *et al. Corrosion Science*[J], 2018, 133(1): 61
- [18] Campo K N, Lopes E S N, Parrish C J *et al. Acta Materialia*[J], 2017, 139: 86
- [19] Li Y H, Chen N, Cui H T *et al. Journal of Alloys & Compounds*[J], 2017, 723(5): 967
- [20] Nersisyan H H, Lee J H, Won C W. *Materials Research Bulletin* [J], 2003, 38(7): 1135

## Effect of Alloying Elements on the Burning Behavior of Burn Resistant Titanium Alloys

Chen Yongnan<sup>1</sup>, Yang Wenqing<sup>1</sup>, Yang Zehui<sup>1</sup>, Zhang Fengying<sup>1</sup>, Zhao Yongqing<sup>2</sup>

(1. Chang'an University, Xi'an 710064, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** To alleviate "Titanium Fire" produced during high pressure and friction of titanium alloy, Ti-V-Cr series and Ti-Cu-Al series burn resistant titanium alloys have been developed. In this work, through a modified direct current simulation burning tests, the burning characteristics, e.g., flame height, velocity and burning products were measured to evaluate the burn resistant behavior. The results show the burning behavior and reveal the corresponding burning mechanisms of titanium alloys with different alloying elements. The formation of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxides during burning of Ti40 alloy enhances the density of oxide layer to block the oxygen diffusion, which leads to excellent burn resistant behavior indicated by the smaller burning velocity and lower flame height. For Ti14 alloys, in comparison, a clear Cu-rich layer is formed at the interface between burning product and heat affected zone, where it consumes oxygen by producing Cu-O compounds, thus reducing the burning reaction with Ti-matrix. This work has established a fundamental understanding of how the alloying elements improve the burning resistance of titanium alloys.

**Key words:** titanium alloys; burn resistance; element; diffusion; burn-resistant mechanism

---

Corresponding author: Chen Yongnan, Ph. D., Professor, School of Material Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China, Tel: 0086-29-82337343, E-mail: frank\_cyn@163.com