

# Ti-Cr 合金的燃烧行为及燃烧产物分析

赵永庆, 周 廉, 邓 炬

(西北有色金属研究院钛合金研究所, 陕西西安, 710016)

摘要: 以 DCSB 法点燃 Ti-Cr 二元合金, 研究该合金的燃烧行为及其燃烧产物。结果表明: Ti (> 10%) Cr 合金元素的燃烧速度较低, Cr 含量大于 15% 的合金阻燃效果更明显。Ti-Cr 合金燃烧产物表面及 Ti (< 10%) Cr 合金的燃烧产物与基体的界面均开裂多孔, 不可能阻止氧向基体内扩散; 而 Ti (> 10%) Cr 合金的燃烧产物与基体的界面氧化物比较致密, 降低了燃烧速度。Ti-Cr 合金的燃烧产物是  $TiO_2$ 、TiO 和  $TiCrO_3$

关键词: Ti-Cr 二元合金; 燃烧; 阻燃钛合金

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1005-5053(2001)01-0006-04

钛及钛合金以其优良的综合性能在先进的高性能航空发动机中得到广泛使用。然而, 在发动机的特定高速、高压、高气流的条件下, 钛合金存在“钛火”的危险, “钛火”已发生几起。为克服这一技术难关, 一些主要钛合金研究国家都在积极研制阻燃钛合金, 在 90 年代初期陆续有些资料报导, 如 Alloy C (Ti-35V-15Cr)<sup>[1~2]</sup>、BTT-1/BTT-3 (Ti-Al-Cu)<sup>[2]</sup>、Ti40 (Ti-25V-15Cr-0.2Si)<sup>[3~4]</sup> 和 Ti14 (Ti-1Al-13Cu-0.2Si)<sup>[5]</sup>。在 Alloy C 和 Ti40 合金中均有大量合金元素 Cr。Cr 是一种共晶型的(相稳定元素, 正因为 Cr 的特殊稳定(相的作用, Ti-Cr 二元合金的研究早已引起人们的重视<sup>[6~7]</sup>, 过去主要研究它们的物理性能和机械性能, 而本文将从另外一个 Ti-Cr 合金的燃烧行为这一完全不同的侧面研究它的特性, 有助于了解它的全面特性, 为合金元素 Cr 在钛合金中的应用提供有益的参考。本文以直流电弧激发燃烧(DCSB)法点燃 Ti-Cr 二元合金, 研究它的燃烧行为并分析其燃烧产物。

## 1 研究方法

试验用的 Ti (5wt% ~ 25wt%) Cr 合金为真空悬浮炉熔炼的 300g 纽扣锭, 经线切割并加工成 45mm × 5mm × 2mm 长条, 采用 DCSB 法<sup>[8~10]</sup>点燃合金, 即在一定的电压、电流条件下, 点燃合金一定时间, 测量燃烧前后重量的变化, 换算为燃烧速度。燃烧后利用 OM, SEM 和

X 射线衍射仪观察、分析燃烧产物及组成。

## 2 试验结果与分析

图 1 为不同 Cr 含量的 Ti-Cr 二元合金的燃烧速度。Cr 含量低于 10%, 合金的燃烧速度变化很小; Cr 含量大于 10%, 合金的燃烧速度降低; Cr 含量大于 15%, 合金的燃烧速度明显降低, 这一结果与资料报导的合金元素 Cr 含量大于 11% 可提高钛合金的阻燃性能<sup>[11]</sup>基本是一致的, 但 Ti-Cr 二元合金并不具有阻燃性能<sup>[8]</sup>。

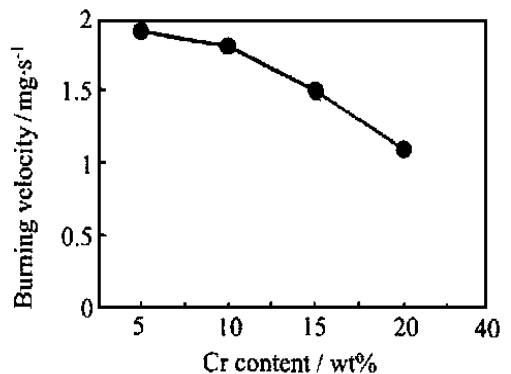


图 1 Ti-Cr 合金的燃烧速度

Fig. 1 Burning velocity of Ti-Cr alloys

图 2 为 Ti-Cr 合金燃烧产物的 X 射线衍射谱线。在 Ti-Cr 合金的燃烧产物中, 除了存在 Ti 的氧化物( $TiO_2$  和 TiO)外, 还存在  $TiCrO_3$  的化合物。合金中 Cr 含量高, 合金元素 Cr 在某些区域可能聚积的可能性更大。

在含 Cr 的钛合金高温氧化研究中还没有资料报导  $TiCrO_3$  这种化合物的出现, 在 Ti-Cr 合金

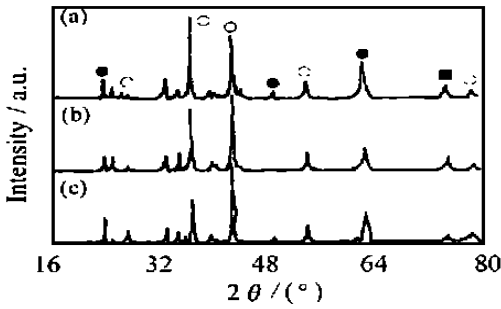


图 2 Ti-Cr 合金燃烧产物的 X 射线衍射谱线  
 Fig. 2 X-ray patterns of burning products of Ti-Cr alloys  
 (a) Ti+5Cr; (b) Ti+15Cr; (c) Ti+20Cr

的燃烧试验中难何出现? Ti-Cr 合金的燃烧温度很高, 很可能通过下列反应生成 TiCrO<sub>3</sub>:

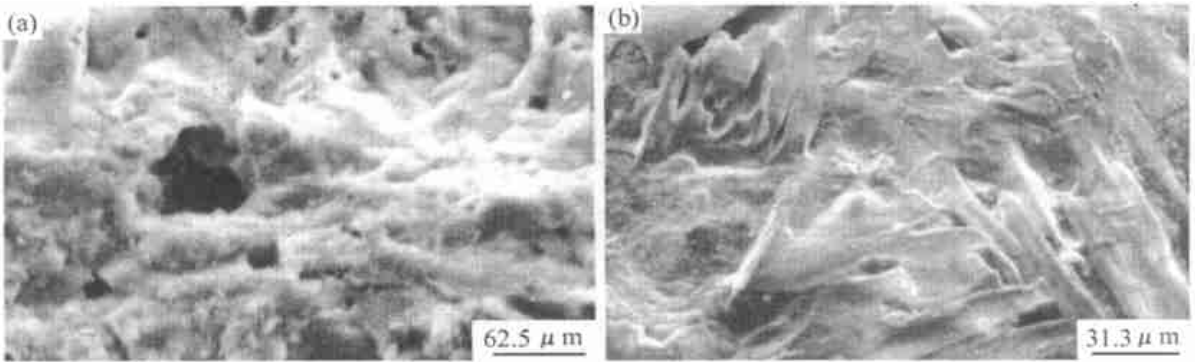
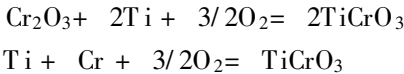


图 3 Ti-Cr 合金燃烧产物表面的形貌  
 Fig. 3 Surface images of Ti-Cr alloys' burning products (a) Ti+5Cr; (b) Ti+20Cr

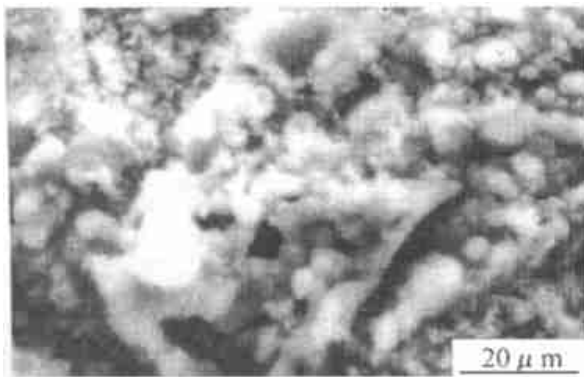
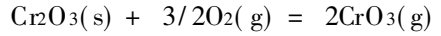


图 4 Ti-Cr 合金燃烧产物内部的形貌  
 Fig. 4 Internal images of burning products of Ti-Cr alloy

产物内部的形貌。产物内部也严重开裂, 氧化层

TiCrO<sub>3</sub> 一旦生成将以稳定的形式存在于燃烧产物中。

另外在燃烧高温下, 由于可能生成的 CrO<sub>3</sub> 蒸发使燃烧产物多孔:



在 950~1050℃氧化时, Cr 的蒸发速度与 Cr 的氧化速度相当<sup>[12]</sup>, 高于 1050℃的燃烧使 Cr 的蒸发速度大于 Cr 的氧化速度, 致使燃烧产物中可能不存在 Cr 的氧化物。由于 CrO<sub>3</sub> 蒸发使燃烧产物表面贫 Cr, 而在燃烧产物与基体的界面上由于 Cr 从基体向产物的扩散, 若扩散速度大于蒸发速度, 在界面上将富积 Cr 的氧化物。合金燃烧产物表面和燃烧产物与基体界面的半定量 EDAX 分析<sup>[8]</sup>也证实了这一结果。

图 3 为 Ti-Cr 合金燃烧产物表面的形貌, Ti-Cr 合金燃烧产物表面严重开裂, 不可能阻止氧向产物内和基体内扩散。图 4 为 Ti-Cr 合金燃烧

多孔疏松, 这些裂纹是氧向基体内扩散的途径。氧的不断供应, 使燃烧的化学反应持续进行, 燃烧也就持续进行。

图 5 为 Ti-Cr 合金燃烧产物与基体界面的 SEM 形貌。Ti+5Cr 和 Ti+10Cr 合金的界面仍有裂纹存在, 氧化层也为多孔疏松。而 Ti+15Cr 和 Ti+20Cr 合金(尤其是 Ti+20Cr 合金)的界面相对来说不存在明显裂纹, 氧化层不存在明显孔隙, 在一定程度上有抑制氧向基体内扩散的作用<sup>[10]</sup>, 延迟燃烧的化学反应, 降低燃烧速度。

图 6 为 Ti+5Cr 和 Ti+15Cr 合金燃烧后离开燃烧头部 2 厘米区域(燃烧影响<sup>[13]</sup>前点)的金相形貌, 二者的氧化层均开裂, 不致密, 但 Ti+15Cr 的“晶粒”明显比 Ti+5Cr 细小(“晶粒”尺寸分别为 25μm 和 50μm), 说明 Ti+15Cr 合金燃烧时相对

来说较稳定。从一个侧面也说明该合金的燃烧速度低于 T+5Cr 合金。

图 7 为 T+Cr 合金燃烧影响区及基体的金相组织。T+Cr 合金燃烧影响区均为粗大的组织，

T+5Cr 合金为粗大针状组织，T+20Cr 合金的组织与其基体的组织相差不大，即燃烧时该合金相对较稳定。燃烧影响区的金相观察进一步表明，T+( > 10% ) Cr 合金的燃烧速度较低。

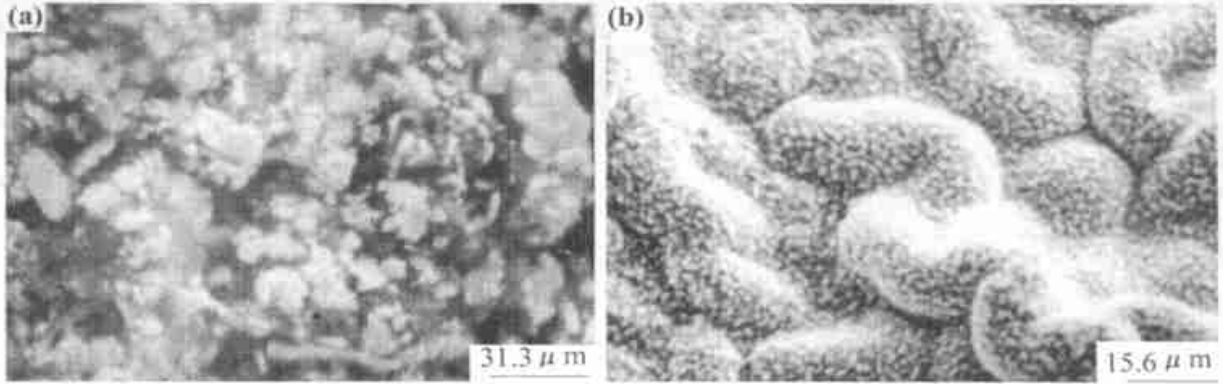


图 5 Ti+Cr 合金燃烧产物与基体界面的 SEM 形貌

Fig. 5 SEM images of interface between burning products and matrix of Ti+Cr alloys (a)Ti+5Cr; (b) Ti+20Cr

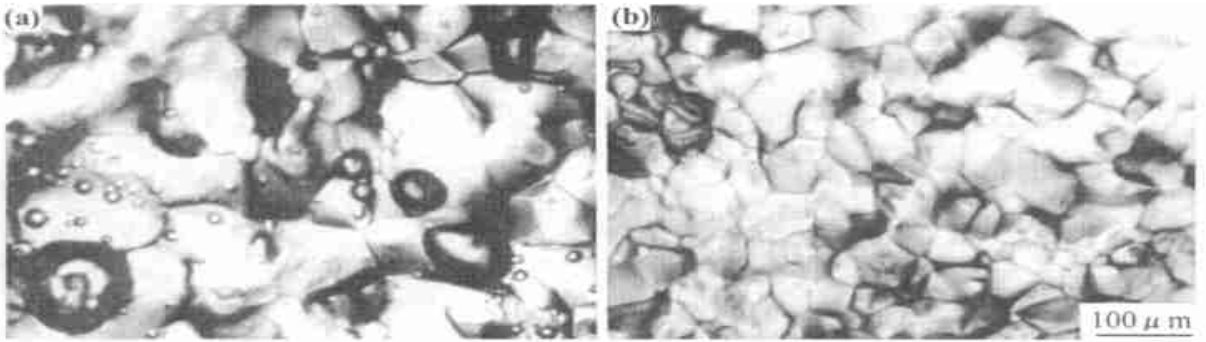


图 6 Ti+5Cr(a) 和 Ti+15Cr(b) 合金燃烧影响前点的金相形貌

Fig. 6 OM images of the front point of burn affected zone for Ti+5Cr(a) and Ti+15Cr(b) alloys

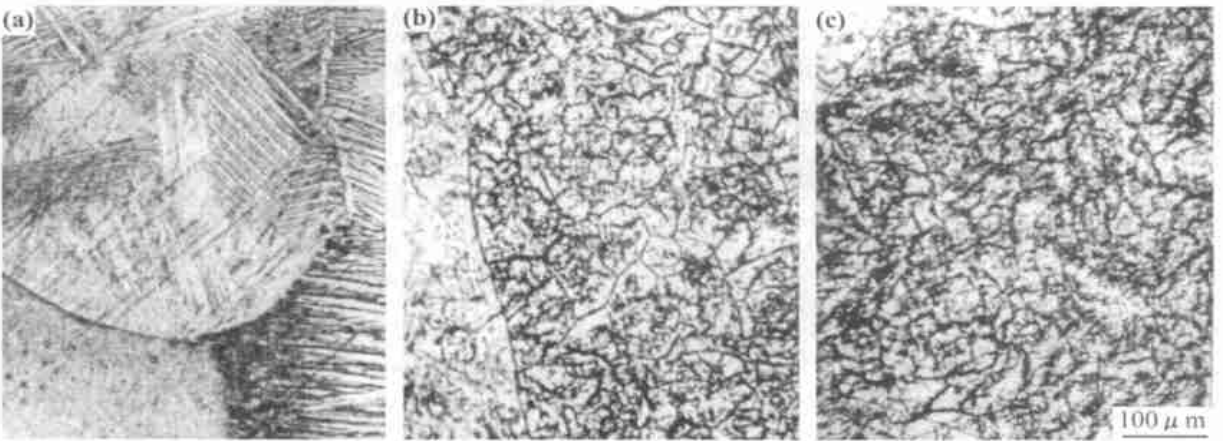


图 7 Ti+Cr 合金燃烧影响区前点及基体的金相组织

Fig. 7 OM structures of the front of the burn affected zone of Ti+Cr alloys and the matrix (a)the front point of burn affected zone of Ti+5Cr; (b)the front point of burn affected zone of Ti+20Cr; (c) matrix of Ti+15Cr

## 4 结论

(1) Ti( $> 10\%$ ) Cr 合金的燃烧速度较低, Cr 含量大于 15% 效果更明显。

(2) Ti-Cr 合金燃烧产物表面及 Ti( $< 10\%$ ) Cr 合金的燃烧产物与基体的界面均开裂多孔; 而 Ti( $> 10\%$ ) Cr 合金的燃烧产物与基体的界面的氧化物比较致密, 可阻止氧向基体内扩散, 降低燃烧速度; 燃烧影响区的金相观察同样证实了这一结果。

(3) Ti-Cr 合金的燃烧产物是  $TiO_2$ 、 $TiO$  和  $TiCrO_3$ 。

### 参考文献

- [1] EYLON D. Issues in the Development of Beta Titanium Alloys[J], JOM, 1994(6): 14- 15.
- [2] 赵永庆, 赵香苗, 朱康英. 阻燃钛合金. 稀有金属材料与工程, 1996(5): 1- 6.
- [3] 赵永庆, 赵香苗, 朱康英. [P]. 中国专利申请号 No: 97 1 12303. 9
- [4] 赵永庆, 赵香苗, 朱康英. Ti-V-Cr 阻燃钛合金的微观组织[J]. 中国有色金属学报, 1998(3): 463- 466.
- [5] 赵永庆, 赵香苗, 朱康英. [P]. 中国国防专利 97 1 12302. 0
- [6] HANADA S, IZUMI O. Deformation behavior of retained beta phase in beta eutectoid Ti-Cr alloys. J of Materials Science, 1986(21): 4131- 4139.
- [7] Collings E. W. The physical metallurgy of titanium alloys [M]. American Society for Metals, Metals Park, OH 44073, 1984. 118- 124.
- [8] 赵永庆, 周廉, 邓炬. Ti40 合金的阻燃特性和阻燃机理 [J]. 稀有金属材料与工程, 1998(3): 77- 80.
- [9] ZHAO Yong-qing, ZHOU Lian, DENG Ju. Effects of alloying element Cr on the burning behavior of titanium alloys[J] J of Alloys and Compounds, 1999(284): 190- 193.
- [10] ZHAO Yong-qing, ZHOU Lian, DENG Ju, The role of interface in the burning of titanium alloys, Material Science & Engineering A, 1999, A267: 167- 170.
- [11] SCHUTZ R. W. Environmental behavior of beta titanium alloys[J], JOM, 1994, (6): 245- 29
- [12] KUBASCHEWSHI O. AND HOPKINS B. E., Oxidation of metals and alloys[M], second edition. Butterword Co. Ltd, London, Butterworths, 1962, 95- 225.

## Study on the burning behavior of Ti-Cr binary alloys and their burning products

ZHAO Yong-qing, ZHOU Lian, DENG Ju

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, P. O. Box 51, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The burning behavior of Ti-Cr binary alloys and their burning products are studied by means of direct current simulation burning(DCSB) ignition method. The results indicate that the burning velocity of Ti( $> 10\%$ ) Cr alloys is low. If the alloying element Cr content is greater than 15% the burning speed is lower. Burning product surface cracks and their oxide scales are porous. The interface between burning products and matrix is also porous for Ti( $< 10\%$ ) Cr alloys, which can not retard oxygen diffusion into the matrix. While the interface of Ti( $> 10\%$ ) Cr alloys is tenacious, which can retard oxygen diffusion into the matrix and decrease the burning velocity. The products of Ti-Cr alloys are  $TiO_2$ ,  $TiO$  and  $TiCrO_3$ , and the reasons for  $TiCrO_3$  formation are analyzed.

**Key words:** Ti-Cr binary alloys; burning; burn resistant titanium alloys