

激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金的阻燃性能

张凤英, 邱莹, 梅敏, 杨雪坤, 胡腾腾

(长安大学, 陕西 西安 710064)

摘 要: 研究了激光立体成形 (laser solid forming, LSF) Ti-25V-15Cr 合金的阻燃性能。采用直流电弧激发燃烧法 (direct current simulation burning, DCSB) 测试其阻燃性能并与锻造 Ti40 合金进行比较。基于二者原始组织、燃烧产物的观察与分析揭示其阻燃机理。结果表明, 激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金的燃烧速率略低于锻造 Ti40 合金。燃烧后各区域组织分析表明, 激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金和锻造 Ti40 合金燃烧产物区均由 Ti 的氧化物、V 的氧化物以及基体组成, Ti-25V-15Cr 合金燃烧产物区氧化物面积略小于锻造 Ti40 合金, 同时燃烧热影响区的晶界和亚晶界处发现明显的 V、Cr 元素的偏聚。激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金中局部枝晶组织以及亚晶粒的形成增加了微观结构的缺陷, 在受热条件下使得 V、Cr 元素的扩散能力增强, 是其抗燃烧性能略优于锻造 Ti40 合金的原因。

关键词: 激光立体成形; Ti-25V-15Cr 合金; 燃烧产物; 阻燃机理

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)06-1771-08

钛及钛合金因质轻、比强度高、耐高温、耐腐蚀、无磁性、无毒、可焊等优异的综合性能, 在航空、航天、化工、机械、汽车和生物医药等领域中应用广泛, 特别是在设计先进航空发动机时, 钛合金更是不可或缺的关键材料^[1,2]。然而, 钛及普通钛合金在高性能的航空发动机的苛刻环境中存在致命的持续燃烧敏感问题, 这会进一步导致钛火故障。为降低燃烧事故发生率, 提高飞机运行的安全性, 各国的航空动力和航空材料专家致力于对持续燃烧不敏感、本身具有良好阻燃性能的钛合金 (阻燃钛合金) 的研制^[3]。值得一提的是, Ti-V-Cr 系阻燃钛合金因具有较优良的抗燃烧性能和力学性能, 成为各国航空材料学者研究的重点。Zhao Yongqing 等^[4-9]研究出 Ti-V-Cr 系新型阻燃钛合金 Ti40(Ti-25V-15Cr-0.2Si), 并系统研究了 Ti40 阻燃钛合金的合金化行为、热加工条件下的本构关系以及再结晶行为、热压缩下的变形和断裂机制等。雷力明等人^[10]制备了 Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C-X(X=0, 2Mo, 0.2Si+2Mo) β 型低成本阻燃钛合金, 并研究了该合金的蠕变变形结构。Zeng Weidong 等^[11-13]研究了 Ti-35V-15Cr-0.3Si-0.1C 合金热加工过程中的第二相颗粒促进再结晶形核以及热压缩中的断裂机制等。然而, 由于 Ti-V-Cr 系列合金变形抗力大, 为合金的熔炼和加工都带来了较大的困难。

激光立体成形 (LSF) 是一项高性能金属增材制造技术, 通过激光熔覆沉积, 将仅在零件表面和局部区域获得的凝固组织扩展到整个三维空间, 最终实现具有高性能复杂结构致密金属零件的无模具、快速、近净成形^[14]。激光立体成形钛合金具有良好的工艺成形性, 且成形材料具有致密的显微组织和良好的综合性能, 因而引起了各国研究学者的广泛关注, 在航空、航天、医疗等领域显示出了广阔的应用前景, 且部分获得应用^[15,16]。激光立体成形的技术优势有望为阻燃钛合金的设计、制备及零件成形提供一条可行的技术途径。Wu 等人^[17]研究了 Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C 在激光加工条件下, 微观结构对拉伸性能和蠕变性能的影响规律。Wang 等人^[18]利用 Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C 粉末和 Ti-6Al-4V 线材制备功能梯度合金, 在送丝速度一定的前提下通过改变送粉速率来控制成分, 发现晶粒尺寸比 Ti-6Al-4V 线材更细小。作者^[19]前期在 Ti40 合金成分的基础上, 针对激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金的显微组织形成及其影响因素展开研究, 揭示了其凝固组织形成机理, 证实了激光立体成形 Ti-25V-15Cr 的可行性。然而, 激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金的阻燃性能能否满足应用需求是其能否得以进一步发展和应用的关键。朱康英^[20]等人利用直流电弧激发燃烧法 (DCSB) 对 Ti-6Al-4V、Ti40 和 Alloy C 等钛合金进行

收稿日期: 2017-09-03

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB1100103, 2016YFB0700301); 中国博士后科学基金 (2016M592731); 国家自然科学基金 (51401033); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2016JQ5022)

作者简介: 张凤英, 女, 1980 年生, 博士, 副教授, 长安大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710064, 电话: 029-82337340, E-mail: zhangfengying@chd.edu.cn

阻燃性能测试, 结果表明 Ti40 与 Alloy C 合金的阻燃性能均显著优于 Ti-6Al-4V 合金。Guangbao Mi^[21]等采用摩擦点燃的方法, 实验研究了 Ti40 和 Alloy C 等典型 Ti-V-Cr 系阻燃钛合金的抗点燃性能, 结果表明 Ti40 钛合金被点燃时所对应的氧浓度至少比 Ti-6Al-4V 高 40%。本研究拟针对激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金的阻燃性能展开研究, 测试其阻燃性能并与锻造 Ti40 合金进行对比, 基于二者的燃烧产物分析揭示其阻燃机理。

1 实验

本研究以元素粉末为原料用激光立体成形技术制备 Ti-25V-15Cr 合金。实验材料为纯 Ti 粉 (74~147 μm)、纯 V 粉 (43~74 μm) 和纯 Cr 粉 (74~147 μm)。粉末的化学成分符合 GJB2921-1997 标准。实验前将 Ti、V、Cr 元素粉末按质量分数 (下同) 60%Ti+25%V+15%Cr 的比例混合, 在 120 $^{\circ}\text{C}$ 真空条件下进行烘干处理后, 在球磨机上机械混合 20 min。实验所用基材为几何尺寸 140 mm×60 mm×6 mm 的 TC4 板材, 实验前先用砂纸将基材表面的氧化层打磨掉, 再用无水乙醇和丙酮依次清洗干净。

本实验是在成套激光立体成形设备上完成的。该装备由 4 kW CO_2 激光器、数控工作台、惰性气氛加工室、高精度可调送粉器以及同轴送粉喷嘴组成。采用多道多层沉积的方式在 TC4 基材上沉积 40 mm×10 mm×10 mm 的 Ti-25V-15Cr 合金块状燃烧试样 (如图 1)。实验主要工艺参数如下: 激光功率 $P=2100\text{ W}$, 扫描速率 $V=10\text{ mm/s}$, 光斑直径 $d=2.5\text{ mm}$, 送粉率 $M=4\text{ g/min}$, 载粉气体流量 $Q=180\text{ L/h}$, Z 轴单层行程 ΔZ 为 0.2 mm, 搭接率 40%。沉积方向沿 Z 轴, 扫描方向沿 X 轴, 并且各层之间扫描方向相同。

采用线切割在激光立体成形 Ti-25V-15Cr 试样的上部切取 2 块尺寸为 10 mm×10 mm×5 mm 的试样分别

用于抗燃烧性能测试和原始组织观察。采用其中一块制备金相试样, 利用 OLYMPUS 光学显微镜(optical microscope, OM)观察 XOY, YOZ 和 XOZ 截面组织 (截面坐标如图 1 所示)。同时, 在 Ti40 锻件上切取 2 块同尺寸试样用于金相和阻燃性能测试。在密闭的实验室内, 电流为 5A, 空气流速为 10 m/s 的条件下, 利用 DCSB 法分别点燃 Ti-25V-15Cr 试样以及 Ti40 锻件试样, 燃烧时间为 3s。燃烧过程结束后, 采用 Bruker D8ADVANCE 型 X 射线衍射仪分析燃烧产物的相组成; 制备金相试样, 采用 OM、Hitachi-S4800 扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察燃烧基体、燃烧热影响区、燃烧产物区的组织特征, 采用 SEM 附带的能谱分析仪 (energy dispersive spectrometer, EDS)分析燃烧产物成分, 探讨燃烧机理。

2 结果与讨论

2.1 LSF Ti-25V-15Cr 和锻造 Ti40 合金凝固组织特征

图 2a~2e 显示了激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金的光学显微组织特征。从中可以看出, 在本研究工艺条件下, 激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金主要由 2 种典型的晶粒组成: 竹节状的小柱状晶和类等轴晶。柱状晶平均宽约 200 μm , 沿垂直扫描方向外延生长, 类等轴晶等效直径约 80 μm , 局部分布于小柱状晶之间 (图 2a, 2b)。此外, 高倍 SEM 下观察发现, 局部单层熔覆层底部形成柱状树枝晶, 枝晶臂间距 3~4 μm (图 2d)。同时, 单层熔覆层中上部晶粒内及晶界处存在白色点状颗粒, EDS 点扫描测试以及局部背散射 (back scattered electron imaging, BSE) 分析表明, 白色点状颗粒成分与周围基体成分一致 (图 2e、2f)。Zhao Yongqing^[22]等人针对 Ti40 合金固溶时效处理后的显微组织展开研究, 同样发现 Ti40 合金经固溶时效处理后, 晶粒内部及晶界处存在白色点状颗粒。透射研究表明, 白色点状颗粒并非第二相析出, 而是亚晶。基于以上分析, 推测激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金内部的白色点状颗粒同样为亚晶, 且高倍观察可以发现, 部分点状颗粒连成线状, 表明部分小角度晶界倾向于向大角度晶界转变 (图 2e)。

针对激光立体成形 Ti-25V-15Cr 原始 β 晶粒形态的形成机理, 作者前期开展过相关研究并进行相关报道^[19]。对于激光立体成形 Ti-25V-15Cr 局部枝晶和亚晶的形成, 分析认为是由于 Ti-25V-15Cr 为单相 β 钛合金, 激光立体成形过程中, 熔池内的凝固过程是典型的非平衡快速凝固过程。由于温度梯度高, 凝固速率快而形成胞状晶或者枝晶偏析。同时由于激光立体成形过程是多层熔覆沉积过程, 每一层沉积完成后要经

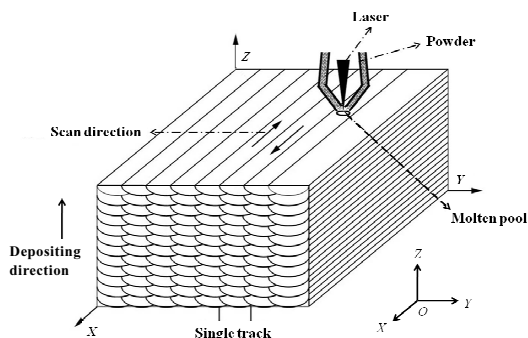


图 1 激光立体成形 Ti-25V-15Cr 工艺过程示意图

Fig.1 Schematic of LSF Ti-25V-15Cr alloy

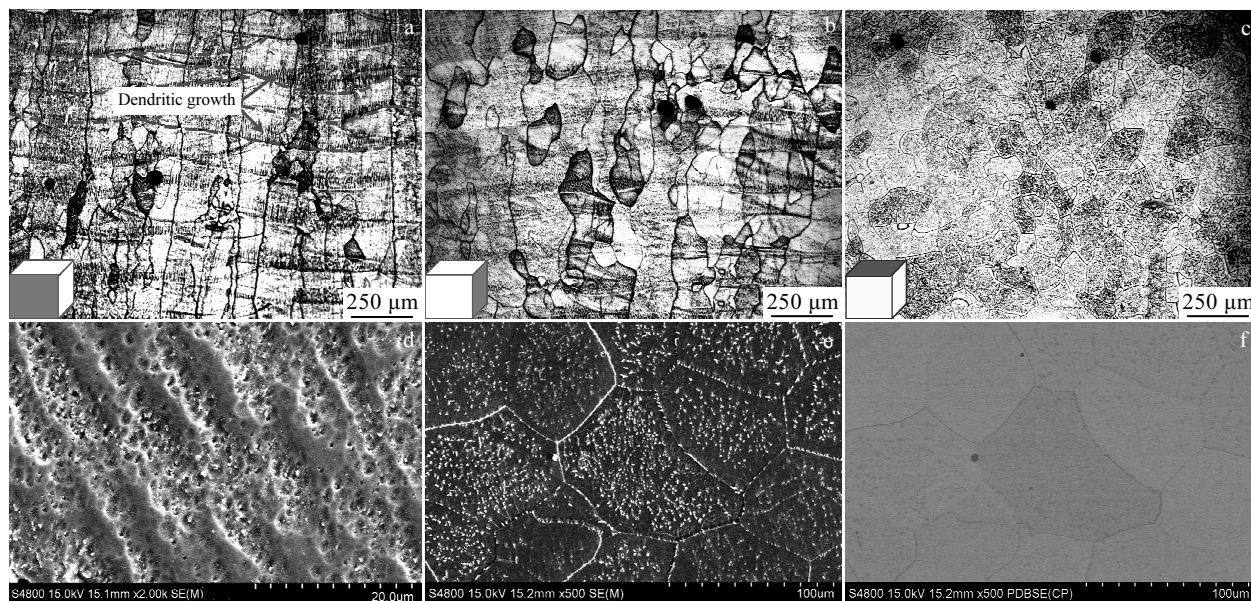


图 2 激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金沉积试样凝固组织

Fig.2 Micrographs of three sections of LSF Ti-25V-15Cr alloy: (a) YOZ section, (b) XOZ section, (c) XOY section, (d) dendritic grains; highly magnified subgrains under SEM (e) and BSE image (f)

历多次热循环过程, 单层熔覆层中上部的胞状晶或者枝晶偏析在热作用下得以消除, 激光增材制造的微区应力集中使得局部区域的胞状晶或者枝晶转变成亚晶(胞状晶和枝晶的形成往往伴随着成分偏析, 而成分偏析的本质使得晶格局部畸变严重, 在热、塑性变形作用下转变为亚晶结构)。

图 3 显示了锻造 Ti40 合金的原始组织形貌。从图

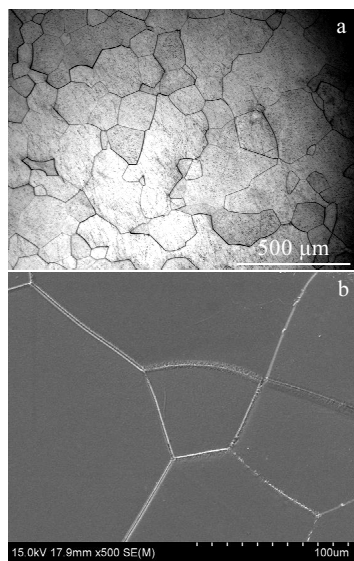


图 3 锻造 Ti40 合金的凝固组织

Fig.3 Microstructures of forging Ti40 alloy: (a) OM image and (b) SEM image

中可以看出, 锻造 Ti40 合金的凝固组织由等轴晶组成。SEM 下观察发现, 原始 β 晶粒内部不存在第二相颗粒或者亚结构。

2.2 Ti-25V-15Cr 合金和 Ti40 合金的燃烧速率

本研究通过计算 Ti-25V-15Cr 合金和 Ti40 合金的燃烧速率来反映二者的抗燃烧性能, 并进行对比。其中燃烧速率定义为:

$$v = \frac{m_1 - m_0}{t} \quad (1)$$

其中: v —燃烧速率(g/s); m_1 —燃烧后样品的质量(g); m_0 —燃烧前样品的质量(g); t —燃烧的时间(s)。

由于在燃烧的过程中氧进入基材, 并与元素发生反应, 因此增重越大, 表明与氧发生反应的元素就越多, 燃烧速率就越大。采用公式(1)计算可得到 Ti-25V-15Cr 合金和 Ti40 合金的燃烧速率分别为 7 和 8.2 mg/s。可以看出, 锻造 Ti40 合金燃烧的速率略大于激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金, 表明激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金的阻燃性能与锻造 Ti40 合金相当, 略优于锻造 Ti40 合金。

2.3 Ti-25V-15Cr 合金和 Ti40 合金燃烧产物分析

2.3.1 物相及成分分析

图 4a、4b 分别显示了采用 XRD 对 Ti-25V-15Cr 合金和 Ti40 合金燃烧后的燃烧产物进行物相分析的结果。从图中可以看出, 2 种合金的燃烧产物主要是由 TiO_2 和少量的 $\text{VO}_2(\text{V}_2\text{O}_4)$ 组成, 并未发现 Cr 的氧化物。

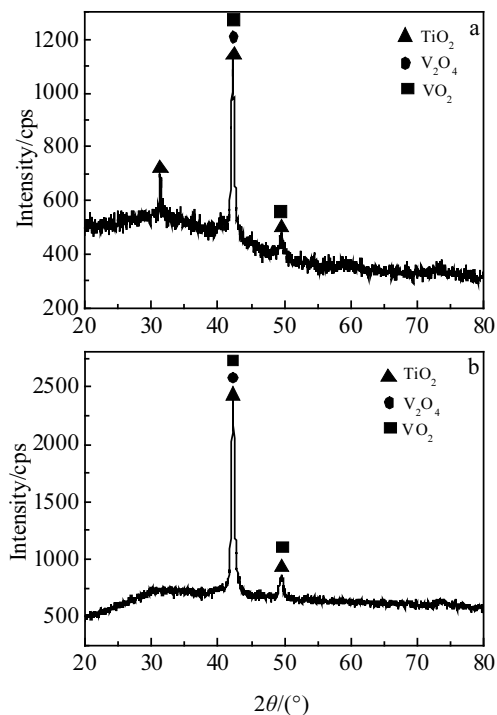


图 4 燃烧产物的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of burned products: (a) Ti-25V-15Cr and (b) Ti40

图 5a、5b 分别显示了光学显微镜下观察到的激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金和锻造 Ti40 合金燃烧后的显微组织。从显微组织的特征上可以看出, 2 种合金燃烧

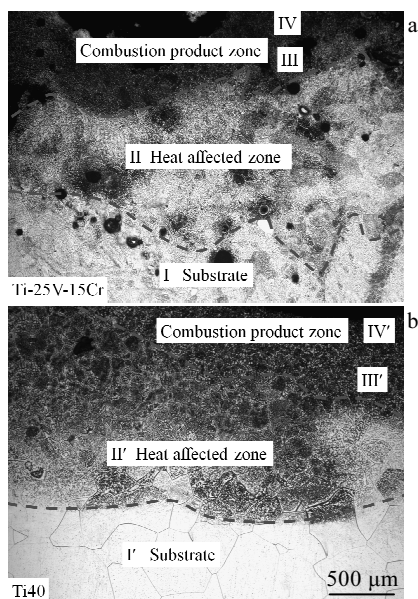


图 5 合金燃烧后的显微组织

Fig.5 Micrographs of the alloy after combustion: (a) Ti-25V-15Cr and (b) Ti40

后的试样主要由 3 个区域组成: 基体(I 和 I')、燃烧热影响区(II 和 II')和燃烧产物区(III、IV 和 III'、IV')。

图 6 定量表征了 EDS 测试获得的激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金和锻造 Ti40 合金燃烧后各区域的元素含量。由图中可以看出, 两种合金基体与热影响区的元素含量均未发生变化, 与原始材料成分一致。燃烧产物区分为内表层(IV 和 IV')和外表层(V、VI 和 V'、VI')两部分, 内表层 V、Cr 元素均显著增加 7%~10%, 并且出现 O 元素, 表明 Ti 元素较原始成分显著降低, 由平均约 60%Ti, 降低至 40%~45% Ti; 而燃烧产物区外表层 O 含量显著增加至平均 4.3%~4.4%, 其中 Ti40 合金 V、Cr 元素与原始成分含量基本一致, Ti-25V-15Cr 合金中的 V 含量降低约 3%, Cr 含量降低约 1%, 表明外表层的氧化物含量明显高于燃烧区内表层。以上各区域成分分析结果表明, 燃烧过程中, V、Cr 元素向表面扩散形成浓度梯度, 在燃烧区内表层形成富集。此外, 锻造 Ti40 合金燃烧区内外表层的氧含量均略高于激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金, 与燃烧测试结果一致。

2.3.2 燃烧后各区域组织分析

图 7a、7b 显示了激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金热影响区显微组织特征。其中图 7a 为靠近基材处, 图 7b 为靠近燃烧产物区处。从图中可以看出, 激光立体

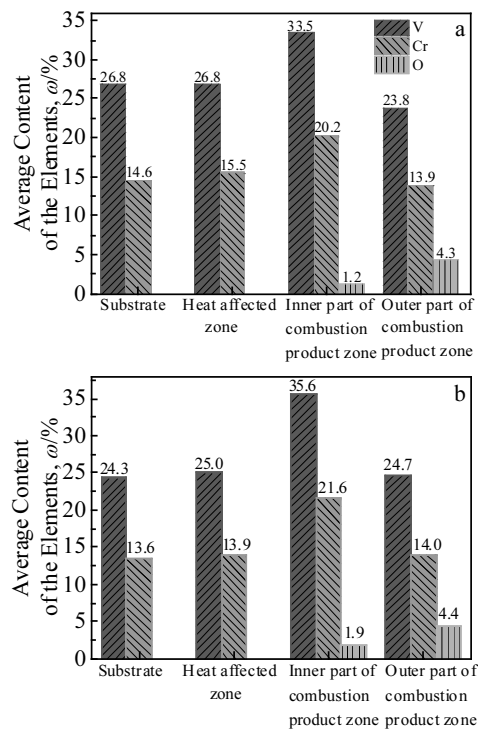


图 6 合金燃烧后各区域元素的平均含量

Fig.6 Average content of the elements in the alloy after combustion: (a) Ti-25V-15Cr and (b) Ti40

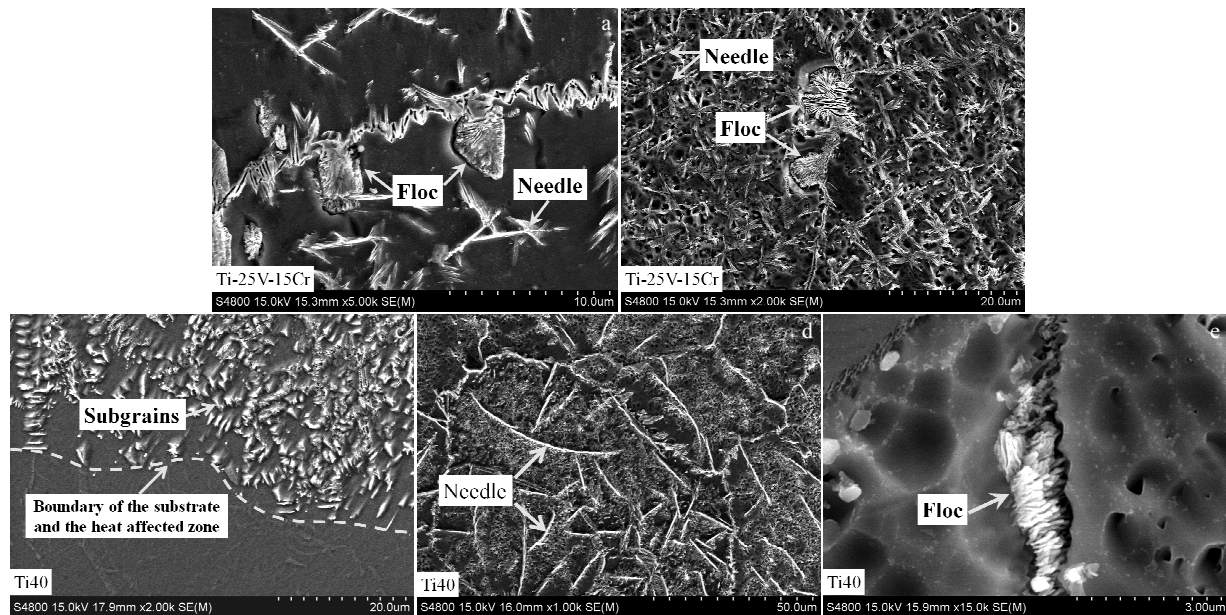


图 7 LSF Ti-25V-15Cr 与锻造 Ti40 燃烧热影响区的显微组织特征

Fig.7 Microstructures in heat affected zone of LSF Ti-25V-15Cr (a, b) and forging Ti40 (c~e) after combustion

成形 Ti-25V-15Cr 热影响区晶内产生大量针状物质, 晶界及局部亚晶界处产生了尺寸 $3\sim 10\ \mu\text{m}$ 的团絮状物质。图 7c~7e 显示的是锻造 Ti40 合金燃烧热影响区的显微组织特征。从图中可以看出, 靠近基体处, 锻造 Ti40 合金的燃烧热影响区内也开始产生亚晶粒, 在靠近燃烧产物区的热影响区内, 晶内产生大量针状组织, 高倍 SEM 下观察发现, 局部也产生了小尺寸的团絮状物质, 宽度仅 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。

利用 EDS 分别对 2 种合金热影响区内的团絮状物质与针状物进行成分测试。结果表明, 晶界处的团絮物中, V、Cr 元素含量明显升高(图 7a 所示团絮状区域 V 含量约 29%, Cr 含量约 18%), 而晶内针状物中 V、Cr 元素含量明显降低(图 7a 针状物质 V 含量为 19%, Cr 含量为 10%), 两者热影响区的平均成分与基体区相一致(如图 6 所示)。这表明在燃烧热影响区内,

V、Cr 元素开始扩散, 且向晶界偏聚, 2 种合金热影响区内均发生了元素的扩散与重新组合。此外, Ti40 合金 III' 区的团絮状物质含量较少, 表明元素偏聚程度小于 Ti-25V-15Cr 合金 III 区。

图 8a、8b 分别显示了激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金和锻造 Ti40 合金试样燃烧产物区内表层 IV 和 IV' 区域的显微组织特征。从图中可以看出, 两者燃烧产物区均产生颗粒状物质, 其中 Ti-25V-15Cr 合金中颗粒状物质弥散分布, 而 Ti40 合金中颗粒状物质更为集中, 汇聚成一片。利用 EDS 对颗粒状物质进行成分分析, 结果表明两种合金生成的颗粒状物质均为 Ti 的氧化物和 V 的氧化物, 其中 Ti-25V-15Cr 合金中氧化物成分为: 80.98% Ti+6.86% V+12.16% O, 而 Ti40 中氧化物成分为 78.62% Ti+5.72% V+15.66% O, 均不含 Cr。图 8c 显示的是背散射模式下观察的 Ti40 中的



图 8 2 种合金燃烧后燃烧产物区内表层的组织

Fig.8 Microstructures of inner surface of combustion product zone: (a) Ti-25V-15Cr, (b) Ti40, and (c) BSE image of oxide in Ti40

氧化物形貌。可以清晰看出,该颗粒状物质由 2 种类型氧化物组成,由于 V 的氧化物呈层片状,推测该混合氧化物中的层片状物质为 V 的氧化物。测试结果表明,颗粒状氧化物中 Ti 的氧化物占更高比例,同时 Ti40 合金中氧含量高于 Ti-25V-15Cr 合金。两合金的燃烧区内表层的 V、Cr 元素平均含量都明显高于基体区(如图 6),V、Cr 出现富集,O 元素开始进入。采用 Image-Pro plus 专业测量软件测量氧化物的面积,结果表明 Ti40 合金中氧化物的面积(约 14.5%)略大于 Ti-25V-15Cr 合金中氧化物(约 11.2%)。

图 9a、9b 分别显示了激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金和锻造 Ti40 合金燃烧产物区外表层 IV 和 IV' 区域的显微组织特征。从中可以看出,两合金燃烧区外表层的氧化物面积均显著增加,且表面组织较致密,同时存在部分未被氧化的基体。图 9a 中 Ti-25V-15Cr 合金燃烧产物区外表层氧化物面积达到约 70%,图 9b 中 Ti40 合金燃烧产物区外表层氧化物面积达到约 78%。此外,与燃烧产物区内表层(图 8)对比可以发现,外表层混合氧化物中的层片状氧化物含量较低,表明混合氧化物中主要以 Ti 的氧化物为主,V 的氧化物含量相对较低。图 10 显示了两合金燃烧产物区内外表层氧化物的含量。从图中可以看出,Ti40 合金燃烧产物区内外表层的氧化物面积都略高于 Ti-25V-15Cr 合金,表明激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金的抗燃烧能力略优于锻造 Ti40 合金,与燃烧测试结果相一致。

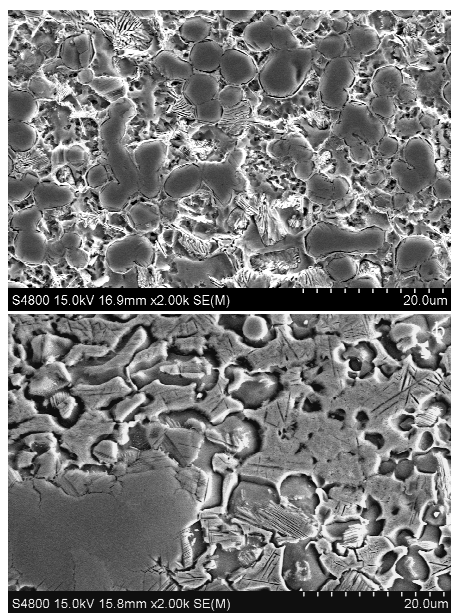


图 9 2 种合金燃烧后产物区外表层的组织

Fig.9 Microstructures of outer part of combustion zone:

(a) Ti-25V-15Cr and (b) Ti40

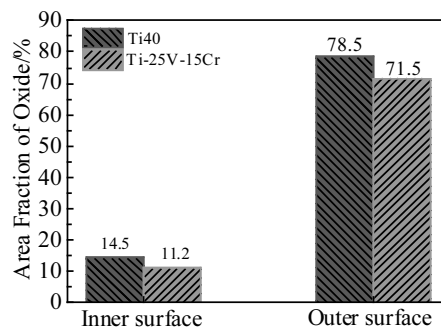


图 10 燃烧区内表层和外表层氧化物的面积分数

Fig.10 Area fraction of oxide in the inner surface and outer surface of combustion product zone

2.4 Ti-25V-15Cr 合金和 Ti40 合金燃烧机理分析

钛合金的燃烧过程与氧化过程相似,均为基体金属或合金元素与氧的反应。根据 Ti-O、V-O、Cr-O 的氧势图^[23](如图 11)可以看出,在任何温度下,Ti 与 O₂ 反应生成 TiO₂ 的吉布斯自由能最小,V 次之,Cr 元素最高。因而 3 种元素相比较,Ti 与 O 的亲合力最高,V 与 O 的次之,Cr 与 O 的亲合力最低,在高温下 Ti 易优先氧化。由此可知,Ti-25V-15Cr 合金和 Ti40 合金发生燃烧时均以 Ti 发生氧化为主,即 Ti 元素优先于 V、Cr 元素形成氧化物,这解释了产物区氧化物以 Ti 的氧化物为主以及存在少量 V 的氧化物的原因。

其次,比较 Ti、V、Cr 元素的电负性以及原子半径可以发现(Ti 的电负性与原子半径分别为 1.54 和 0.147 nm,V 元素为 1.63 和 0.135 nm,Cr 元素为 1.66 和 0.128 nm),V 元素和 Cr 元素的原子半径以及电负性更为接近,二者更容易结合在一起发生偏聚。因而在两种合金的燃烧热影响区内均观察到 V、Cr 元素偏聚形成的团絮状物质。

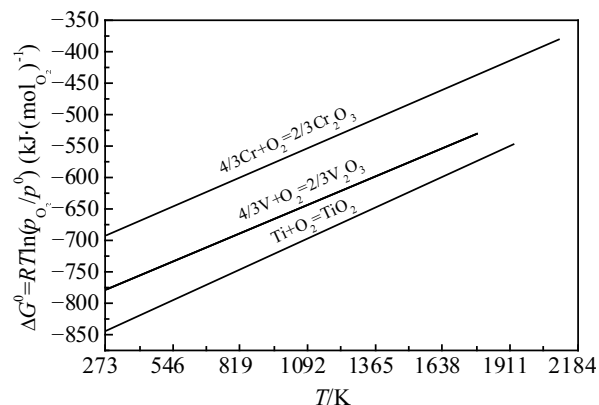


图 11 Ti-O、V-O、Cr-O 的氧势图

Fig.11 Oxygen potential diagram of Ti-O, V-O and Cr-O

此外, 在钛合金中 Ti 的扩散激活能为 293.2 kJ/mol, V、Cr 分别为 134.8、167 kJ/mol^[24], 可见 Ti 原子在基体中的扩散激活能最高, 而 V 原子的扩散激活能最低, 因此, V 与 Cr 原子被激活而进行迁移的几率大于 Ti。本实验条件下, Ti-25V-15Cr 合金和 Ti40 合金在燃烧时燃烧产物区组织形成机理, 如图 12 所示。A、B 分别为 O 和 Ti 扩散迁移的方向, Ti^{4+} 、 V^{4+} 、 Cr^{3+} 向外扩散, 表层 Ti 原子优先与 O 原子结合形成 TiO_2 , 因此燃烧产物区外表层的氧化物主要为 Ti 的氧化物; 随着燃烧的继续, 由于未燃烧区 V、Cr 元素向燃烧区迁移的速率大于 Ti, 且 V 元素的迁移速率大于 Cr, 在燃烧区内表层 V 先于 Cr 与 O 结合形成氧化物, 因此燃烧产物区内表层主要为 Ti 的氧化物和 V 的氧化物的混合物, 且 V、Cr 元素在燃烧区内表层富集; 生成的 V 的氧化物减少了 Ti 与 O 的结合, 同时两合金在燃烧区形成致密的混合氧化物降低了 O 向燃烧产物区的迁移, 在燃烧产物区内表层富集的 V、Cr 元素, 也进一步阻碍了 Ti 元素向燃烧产物区的迁移。综上所述, 燃烧区形成致密的氧化物以及 V、Cr 元素的共同作用减慢了 Ti 与 O 的进一步反应, 从而提高了合金的抗燃烧性能, 因此两合金的阻燃性能都较好。

本研究结果表明, 激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金的抗燃烧性能略优于锻造 Ti40 合金, 分析其原因在于: 基于激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金的组织分析可知, 由于激光立体成形的非平衡快速凝固特性、沉积过程中的微区应力集中以及多层热循环效应, 导致激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金中局部区域形成了枝晶组织以及亚晶粒, 亚结构的形成增加了微观结构的缺陷, 在受热条件下使得 V、Cr 元素的扩散能力增强, 原子活跃程度增加, 更易于扩散至表面形成氧化物或形成元素富集, 从而阻断 Ti 与 O 的进一步结合。此外, Ti-25V-15Cr 合金热影响区的晶界、亚晶界处检测到由于 V、Cr 偏聚而形成的白色絮状物(图 7), 进一步证明了亚结构的存在增加了 V、Cr 原子的活性, 导致了原子活跃程度增加。

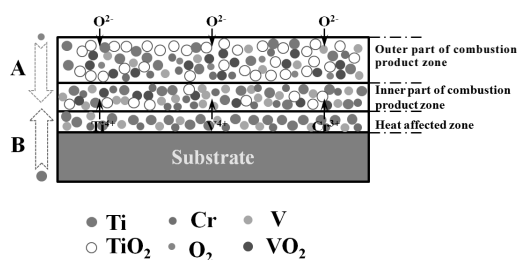


图 12 Ti-25V-15Cr 合金和 Ti40 合金燃烧产物区组织形成机理

Fig.12 Microstructure formation mechanism of combustion products of Ti-25V-15Cr alloy and Ti40 alloy

3 结论

1) 激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金的凝固组织由竹节状小柱状晶和类等轴晶组成, 原始 β 晶内存在部分枝晶和亚晶粒。

2) 激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金的抗燃烧性能与锻造 Ti40 合金相当, 略优于锻造 Ti40 合金, 2 种合金燃烧产物区均以 Ti 的氧化物为主, 存在部分 V 的氧化物, 燃烧热影响区内产生了 V、Cr 元素的偏聚, 但在激光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金中更明显。

3) 激光光立体成形 Ti-25V-15Cr 合金原始致密的沉积层组织以及晶内亚结构的形成, 是其抗燃烧性能略优于锻造 Ti40 合金的原因。

参考文献 References

- [1] Dutta B, Froes F H (Sam). *Metal Powder Report*[J], 2017, 72(2): 96
- [2] Liu Wanying, Lin Yuanhua, Chen Yuhai *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2017, 46(3): 634
- [3] Lai Yunjin(赖运金), Zhang Pingxiang(张平祥), Xin Shewei(辛社伟) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(8): 2067
- [4] Zhao Yongqing, Xin Shewei, Zeng Weidong *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2009, 481: 190
- [5] Han Yuanfei, Zeng Weidong, Zhao Yongqing *et al. Materials and Design*[J], 2010, 31: 4380
- [6] Zhu Yanchun, Zeng Weidong, Zhang Fusheng *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 553: 112
- [7] Zhu Yanchun, Zeng Weidong, Zhao Yongqing *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 552: 384
- [8] Lai Yunjin, Xin Shewei, Zhang Pingxiang *et al. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*[J], 2016, 23(5): 581
- [9] Zeng W D, Shu Y, Zhang X M *et al. Materials Science and Technology*[J], 2008, 24(10): 1222
- [10] Lei Liming (雷立明), Huang Xu (黄旭), Sun Fusheng (孙福生) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(5): 498
- [11] Zhang Saifei, Zeng Weidong, Zhou Dadi *et al. Materials Letters*[J], 2016, 166: 317
- [12] Zhang Saifei, Zeng Weidong, Gao Xiongxiang *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016, 684: 201
- [13] Zhang Saifei, Zeng Weidong, Zhou Dadi *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2015, 24(11):

4377

2017, 46(3): 634

- [14] Huang Weidong (黄卫东). *Laser Solid Forming*(激光立体成形)[M]. Xian: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 1~20, 340
- [15] Huang Weidong, Lin Xin. *3D Printing*[J], 2014, 1(3): 156
- [16] Wang Huaming(王华明). *Defense Manufacturing Technology*(国防制造技术)[J], 2013, 6(3): 5
- [17] Wu X, Sharman R, Mei J *et al.* *Materials and Design*[J], 2004, 25: 103
- [18] Wang Fude, Mei J, Wu Xinhua *et al.* *Applied Surface Science* [J], 2006, 253: 1424
- [19] Zhang Fengying, Liu Tong, Zhao Hanyu *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2017, 46(3): 634
- [20] Zhu Kangying (朱康英), Zhao Yongqing (赵永庆), Qu Henglei (曲恒磊). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2002, 31(1): 17
- [21] Mi Guangbao, Huang Xu, Chao Jinxia *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23: 2070
- [22] Zhao Yongqing, Zhu Kangying, Qu Henglei *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2000, 282(1): 153
- [23] Huang Xihu(黄希祐). *Principles of Iron and Steel Metallurgy*(钢铁冶金原理)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 242
- [24] Gerhard Neumann, Cornelis Tuijn. *Self-Diffusion and Impurity Diffusion in Pure Metals*[M]. Oxford: Pergamon, 2008: 151

Burn-Resistant Property of Laser Solid Forming Ti-25V-15Cr Alloy

Zhang Fengying, Qiu Ying, Mei Min, Yang Xuekun, Hu Tengting

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

Abstract: The burn-resistant property of laser solid forming (LSF) Ti-25V-15Cr alloy was studied, and compared with that of forging Ti40 alloy. The burn-resistant mechanism was disclosed by combining the analysis of the microstructure of the alloy and the combustion products. The results show that the burning rate of Ti-25V-15Cr alloy is slightly lower than that of forging Ti40 alloy. The combustion products of Ti-25V-15Cr alloy and Ti40 alloy are mainly composed of a mixture of Ti oxide and V oxide, and the substrate. The area of the oxide in the combustion product zone of LSF Ti-25V-15Cr is slightly smaller than that of forging Ti40 alloy. Moreover, the distinct segregation of V and Cr at the grain boundary and subgrain boundary in the heat affected zone is found in LSF Ti-25V-15Cr alloy. The formation of the dendrites and subgrains in LSF Ti-25V-15Cr alloy increases the micro-defect and leads to the better diffusion capacity of V and Cr, which is responsible for the better resistance to burning of LSF Ti-25V-15Cr than that of forging Ti40.

Key words: laser solid forming; Ti-25V-15Cr alloy; combustion product; mechanism of resistance to burning

Corresponding author: Zhang Fengying, Ph. D., Associate Professor, School of Material Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China, Tel: 0086-29-82337340, E-mail: zhangfengying@chd.edu.cn