

## Ti-V-Cr系阻燃钛合金激光焊接接头的组织和性能\*

王宏宇,黄爱国,袁晓明,程满,丁瑞

(江苏大学机械工程学院,江苏镇江212013)

**摘要:** 为探明 Ti-V-Cr 系阻燃钛合金的焊接性能,采用激光焊接对模拟有非贯通裂纹的 Ti-25V-10Cr 阻燃钛合金薄板进行了焊接修复,较为系统地研究了激光焊接对其微观组织、显微硬度和拉伸性能的影响。结果表明, Ti-25V-10Cr 阻燃钛合金焊缝组织为粗大的铸态  $\beta$  柱状晶,在焊缝中心能清晰地看到焊缝两侧  $\beta$  柱状晶相对生长的交界面;热影响区仍为单一  $\beta$  等轴晶,仅近熔合线处晶粒变得粗大;同时,焊缝区的硬度已达约 570 HV(为母材硬度的 1.78 倍),而热影响区的硬度相对于母材则变化不大;此外,焊接接头的拉伸强度约为 405 MPa,仅为母材拉伸强度的 40% 左右,拉伸断裂发生在焊缝中心附近处,并呈现以脆性断裂为主的混合断裂。可见, Ti-25V-10Cr 阻燃钛合金的焊接性能将会是制约其进一步广泛应用的主要因素之一。

**关键词:** 阻燃钛合金;焊接性能;激光焊接;显微组织;力学性能

**中图分类号:** TB31;TG456.7

**文献标识码:** A DOI:10.3969/j.issn.1001-9731.2016.增刊(II).012

## 0 引言

Ti-V-Cr 系阻燃钛合金是为了防止“钛火”事故的发生而研制出的一种具有良好抗燃烧性能和高温性能的新型功能材料<sup>[1-4]</sup>。随着各种飞行器性能的不提高,其中的钛合金零件将承受极高的温度、压力和气流速度,而普通钛合金在这种工作条件下存在着非常大的燃烧敏感性。可以说, Ti-V-Cr 系阻燃钛合金已成为航空航天领域极具工程意义的新一代功能结构材料<sup>[4]</sup>。

众所周知,无论是作为结构件的各类桁架还是外壳蒙皮,钛合金薄壁件在航空航天领域中的占比都极大;同时,以焊接尤其是激光焊接取代铆接,已成为钛合金薄壁件连接成形及其微缺陷修复重要的发展趋势之一<sup>[5-7]</sup>。尽管,经过十多年的研发我国在 Ti-V-Cr 系阻燃钛合金成分体系、锻件制备及合金抗点燃性能评价方面均取得了较大的进展<sup>[4]</sup>,然而有关其薄壁件激光焊接成形的研究很少,对于以激光焊接为手段对其微缺陷进行修复的研究则更加鲜见。

本文以 Ti-25V-10Cr 阻燃钛合金为对象,采用激光焊接对模拟有非贯通裂纹的阻燃钛合金薄板进行修复,较为系统地研究了激光焊接对其微观组织、显微硬度和拉伸性能等的影响,以期为 Ti-V-Cr 系阻燃钛合金的激光焊接成形与微缺陷修复及其成分组织性能调控与优化等提供依据。

## 1 实验

## 1.1 实验材料及试样尺寸

实验材料为某企业提供的 0.6 mm 厚 Ti-25V-10Cr 阻燃钛合金薄板,其名义化学成分(质量分数)为 V25%、Cr10%、C0.2% 和余量 Ti,其微观组织如图 1 所示。

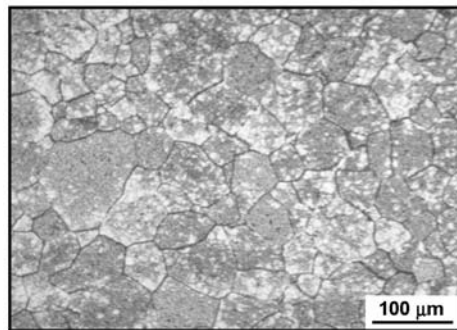


图 1 Ti-25V-10Cr 钛合金的微观组织

Fig 1 Microstructure of Ti-25V-10Cr titanium alloy

从图 1 可以看出, Ti-25V-10Cr 阻燃钛合金是一种  $\beta$  型钛合金,其组织为单相  $\beta$  和分布在晶内及晶界的第二相,第二相通常是杂质元素所形成的碳化物及  $\alpha$  相<sup>[4]</sup>;从图中第二相特征较为显著,可以推断该薄板经历了较为充分的时效处理。实验用试样尺寸为 80 mm×26 mm,为了模拟现实中钛合金薄壁件所出现的宏观裂纹,在试样中部切割出尺寸为 23 mm×0.2 mm 的非贯通直线型缝隙,如图 2 所示。

\* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51372216);江苏省自然科学基金资助项目(BK2011479);江苏省精密与微细制造重点实验室开放基金资助项目(KFA11250-04)

收到初稿日期:2016-05-04

收到修改稿日期:2016-06-30

通讯作者:王宏宇, E-mail: wangdoudou1974@163.com

作者简介:王宏宇 (1974—),男,山西怀仁人,副教授,博士,从事金属与金属基功能材料方面研究。

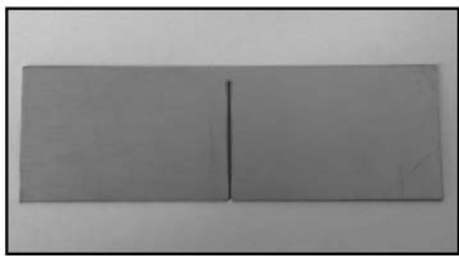


图 2 待焊修钛合金薄板试样

Fig 2 Titanium alloy sheet sample needed welding-repair

### 1.2 实验设备与工艺参数

采用 YLS-2000 型光纤激光焊接系统进行焊接实验。焊接前,先将待焊薄板试样在丙酮溶液中超声清洗去除表面上的油污,然后再使用 4% HF + 30% HNO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O(余量)溶液对其进行酸洗进一步去除表面氧化膜。考虑到裂纹修复与通常无缝对焊不同,其材料有所缺失,故在待修复区施焊正面预置粉末片进行填材<sup>[8]</sup>。根据实验用阻燃钛合金薄板成分采用机械合金化的方法配制填材用粉即 Ti65%、V25%、Cr10%,并压制成 0.35 mm 厚粉末片后预置在薄板待

修复区施焊正面。采用探索性研究所获得的工艺参数进行激光焊接,即激光功率 500 W、焊接速度 1 800 mm/min、离焦量 -0.5 mm(此时光斑直径约为 1 mm);实验过程中同轴通入氩气进行保护。

### 1.3 微观组织与性能表征

焊接后沿垂直于激光扫描方向取样制备金相试样,采用 CMY210 型金相显微镜观察焊接接头组织形貌;采用 HXD1000 型显微硬度计测试焊接接头的硬度及其沿横切面的分布;按照 GB/T228-2010 制备拉伸试样,在 WDW-200 型万能试验机上进行拉伸实验,采用 S3400N 型扫描电镜观察断口形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 焊接接头的微观组织

图 3 为 Ti-25V-10Cr 阻燃钛合金薄板激光焊接接头的微观组织。其中,图 3(a)为焊接接头低倍形貌,图 3(b)、(c)分别为熔合线处和焊缝中部的放大形貌,图 3(d)为热影响区低倍形貌,图 3(e)、(f)分别为热影响区中近焊缝处和近母材处的放大形貌。

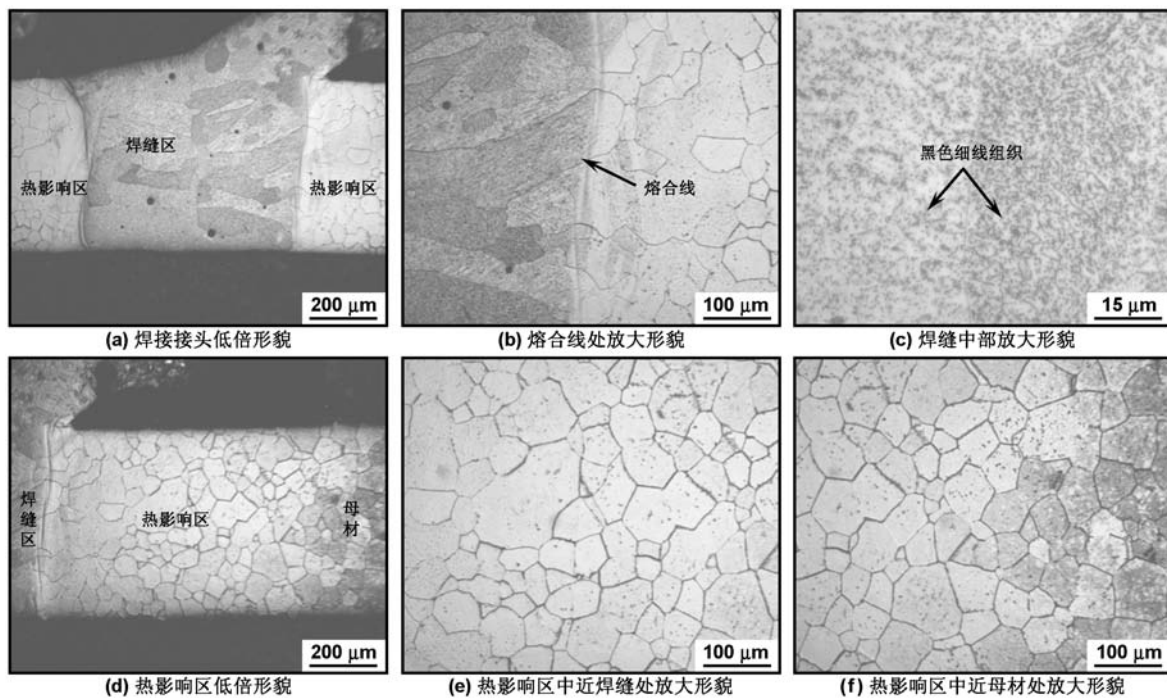


图 3 Ti-25V-10Cr 钛合金激光焊接接头的微观组织

Fig 3 Microstructure of Ti-25V-10Cr titanium alloy laser weld joint

从图 3 可以看出,焊接接头焊缝区组织为粗大的  $\beta$  柱状晶,晶粒边界清晰可见(图 3(a)),且  $\beta$  柱状晶是以焊缝两侧熔合线上母材半熔化晶粒为基底通过联生结晶外延生长而成(图 3(b))。这主要是由于 Ti-25V-10Cr 阻燃钛合金的导热性差,焊接熔池过热严重,均匀形核的发生概率非常低,而熔合线处母材半熔化晶粒表面为非均匀形核提供了良好基底,以致熔池金属优先在母材壁上即现有的固相界面上形核。同时,由于 Ti-25V-10Cr 阻燃钛合金对过热非常敏感,在受到

焊接热作用下母材壁上半熔化晶粒迅速长大,并使得与之联生结晶生长的  $\beta$  柱状晶也呈现出较为显著的长大倾向。进一步观察可发现,在焊缝两侧母材壁上直接形核长大的  $\beta$  柱状晶几乎是垂直于熔合线向焊缝中心相对生长(即沿最大散热方向生长),并在焊缝中心能清楚地看到焊缝两侧  $\beta$  柱状晶相对生长的交界面(图 3(c))所示。焊接接头这种由焊缝两侧联生结晶向焊缝中心相对生长的组织特征,与李艳等有关阻燃钛合金焊接的研究结果是一致的<sup>[9]</sup>。可以推断,焊缝



区的这种组织结构在拉伸载荷作用下,焊缝中心将极有可能成为焊接接头的薄弱处。此外,焊缝  $\beta$  柱状晶中分布着大量的黑色呈细线状组织;根据已有报道可知其为碳化物,该种形态碳化物的存在将极大地影响阻燃钛合金的塑性和强度<sup>[4]</sup>。

从图 3(d)可以看出,热影响区宽度约为 0.8 mm,其与焊缝及母材的分界线均很清楚。热影响区范围比较大,是由于本文实验中所施焊薄板的厚度较薄,导致传热比较迅速,焊缝上部和底部温差小,以致于焊接热量只能向焊缝两侧母材散热。同时,焊缝中没有出现普通钛合金激光焊接中由于焊缝上下部区域温差大而造成的从焊缝上部至底部柱状晶依次减小的梯度特征,这一点也从侧面证实了前面分析中所述的“焊缝上下部区域温差小,更多的焊接热量只能向焊缝两侧的母材散热”这一观点。在焊接热作用下,靠近熔合线处热影响区的晶粒变得粗大;而靠近母材处所受到的热影响比较小,故此处仅有加热痕迹而晶粒基本没有长大。进一步比较图 3(e)和(f)可发现,热影响区组织同母材组织相比,其晶界上和晶粒内部变得更加干净清晰。分析认为,这主要是由于焊接热作用使得靠近熔合线处热影响区组织中的  $\alpha$  相重新固溶于  $\beta$  相中,干净清晰的热影响区组织中黑色点状组织则为难熔碳化物。

2.2 焊接接头的显微硬度

图 4 为 Ti-25V-10Cr 阻燃钛合金薄板激光焊接接头的显微硬度分布曲线。其中,0 点为焊缝中心处的硬度,1-2 点为焊缝区不同位置的硬度,3 点为靠近熔合线处的硬度,4-11 点为热影响区不同位置的硬度,12-15 点为母材不同位置的硬度。

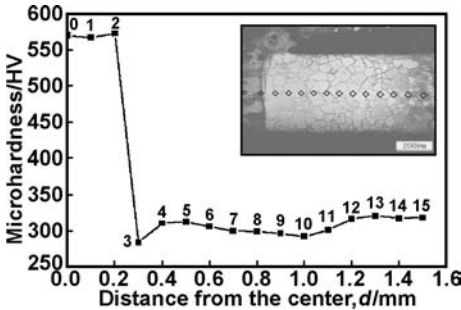


图 4 Ti-25V-10Cr 钛合金激光焊接接头显微硬度分布

Fig 4 Microhardness distribution of Ti-25V-10Cr titanium alloy laser weld joint

从图 4 可以看出,焊缝区的硬度很高且分布较为平缓,其平均值约为 570 HV;在熔合线附近硬度发生了突变,由 573 HV 陡峭下降到 284 HV;同时,热影响区的硬度在 290~312 HV 之间变化(母材硬度约为 320 HV),表明热影响区相对于母材而言变化不大。焊接接头在熔合线处硬度发生剧烈突变与其组织直接相关,在熔合线处由焊缝区铸态的粗大柱状晶逐渐向热影响区尺寸略小的锻态等轴晶转变(图 3(b))。

2.3 焊接接头的拉伸性能

Ti-25V-10Cr 阻燃钛合金激光焊接接头拉伸强度的平均值为 405 MPa,母材的拉伸强度约为 1 002 MPa。可见,焊接接头的拉伸强度明显低于母材,仅为母材的 40%左右。同时,通过对焊接接头拉伸试样的断裂部位观察,发现试样均在焊缝中心处开始断裂。为深入了解焊接接头拉伸断裂的原因,对接头的拉伸断口进行了 SEM 观察分析,如图 5 所示。从图 5 可以看出,焊接接头的拉伸断口形貌为典型的脆性断口形貌,解理台阶和河流花样特征十分明显(图 5(a))。同时,对图 5(a)中方框区域进一步放大后发现,部分区域有韧窝存在。可见,焊接接头拉伸断裂类型为以脆性断裂为主的混合断裂。这一结果,从侧面反映了焊缝中粗大的铸态  $\beta$  柱状晶组织的脆性很大,这与前述硬度测试结果是一致的。

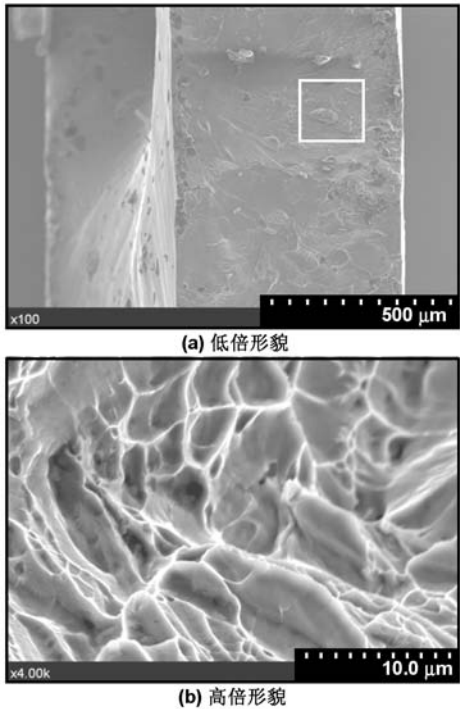


图 5 Ti-25V-10Cr 钛合金激光焊接接头拉伸断口 SEM 形貌

Fig 5 Fracture SEM morphologies of Ti-25V-10Cr titanium alloy laser weld joint

3 结 论

采用激光焊接对模拟有非贯通裂纹的 Ti-25V-10Cr 阻燃钛合金薄板进行了修复,较为系统地研究了激光焊接对其微观组织、显微硬度和拉伸性能等的影响。研究表明,激光焊接 Ti-25V-10Cr 阻燃钛合金焊缝为高硬度(570 HV,约为母材的 1.78 倍)、脆性极大的粗大铸态  $\beta$  柱状晶,其拉伸强度仅为母材的 40%左右;可见,Ti-25V-10Cr 阻燃钛合金的激光焊接性能较差。综上所述,要想使 Ti-V-Cr 系阻燃钛合金在航空航天领域中得到更加广泛地应用,一方面需要从材料

成分体系方面进行优化提高其可焊性,另一方面需要加强焊后处理及改性方面的研究。

### 参考文献:

- [1] Li Y G, Loretto M H, Rugg D, et al. Effect of heat treatment and exposure on microstructure and mechanical properties of Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C(wt%)[J]. *Acta Materials*, 2001, 49(15): 3011-3017.
- [2] Hood R, Lechner F, Aspinwall D K, et al. Creep feed grinding of gamma titanium aluminide and burn resistant titanium alloys using SiC abrasive[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47(9): 1486-1492.
- [3] Mi G B, Huang X, Cao J X, et al. Frictional ignition of Ti40 fireproof titanium alloys for aero-engine in oxygen-containing media[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(18): 2270-2275.
- [4] Cao Jingxia, Huang Xu, Mi Guangbao, et al. Research progress on application technique of Ti-V-Cr burn resistant titanium alloys[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2014, 34(4): 92-97.  
曹京霞, 黄 旭, 弭光宝, 等. Ti-V-Cr 系阻燃钛合金应用研究进展[J]. *航空材料学报*, 2014, 34(4): 92-97.
- [5] Xu P Q. Microstructure characterization of Ti-6Al-4V titanium laser weld and its deformation[J]. *Transactions of*

*Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(9): 2118-2123

- [6] Zhao S S, Yu G, He X L, et al. Microstructural and mechanical characteristics of laser welding of Ti6Al4V and lead metal[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(7): 1520-1527.
- [7] Chen Changjun, Zhang Ming, Ma Hongyan, et al. Surface oxygen diffusion hardening of BT20 titanium alloy[J]. *Journal of Functional Materials*, 2008, 39(3): 437-439.  
陈长军, 张 敏, 马红岩, 等. BT20 钛合金表面渗氧研究[J]. *功能材料*, 2008, 39(3): 437-439.
- [8] Wang Hongyu, Zuo Dunwen, Jiao Guangming, et al. Coatings formed by squash presetting powder type laser cladding[P]. China: CN200710135477.0, 2007-11-21.  
王宏宇, 左敦稳, 焦光明, 等. 以压片法预置粉末进行激光熔覆得到涂层的方法[P]. 中国: CN200710135477.0, 2007-11-21.
- [9] Li Yan, Li Xiaofei, Deng Jixiong, et al. Effect of trace carbon on properties of welded Joint of burn resistant titanium alloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(3): 126-129.  
李 艳, 李小飞, 邓继雄, 等. 微量碳对阻燃钛合金焊接接头性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(3): 126-129.

## Microstructure and properties of Ti-V-Cr burn-resistant titanium alloy sheet laser welding joint

WANG Hongyu, HUANG Aiguo, YUAN Xiaoming, CHENG Man, DING Rui

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** To explore welding performance of Ti-V-Cr burn-resistant titanium alloy, welding repair of Ti-25V-10Cr burn-resistant titanium alloy sheet with a simulative non-through crack was carried out by adopting laser welding, and effects of laser welding on microstructure, microhardness and tensile property were investigated. Results show that the welding seam microstructure is coarse as-cast  $\beta$  columnar crystals, and the relative growth interface of  $\beta$  columnar crystals on both sides is visible in welding seam center. The heat-affected zone (HAZ) microstructure remains single  $\beta$  equiaxed crystals, and only some grains closed to the fusion line is coarsening. Meanwhile, the microhardness of welding seam reaches to about 570 HV that is 1.78-fold of the one of base metal, but the microhardness of HAZ changes a little. Moreover, the tensile strength of welded joint is about 405 MPa that is only 40% or so of base metal. The fracture of the tensile samples occurs near the welding seam center, and the tensile fracture presents a mixed rupture and the brittle rupture is prominent. It can be concluded that the welding performance of Ti-25V-10Cr burn-resistant titanium alloy will be a main restricting factor for its widespread application.

**Key words:** burn-resistant titanium alloy; welding performance; laser welding; microstructure; mechanical property