

# 热处理对激光快速成形 TC21 钛合金组织和硬度的影响

## Effect of Heat Treatment on Microstructure and Hardness of Laser Rapid Forming TC21 Alloy

中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司 黄勇胜  
西北工业大学凝固技术国家重点实验室 陈静

**[摘要]** 采用激光快速成形技术制备出 TC21 钛合金块状坯料,研究了去应力退火及固溶时效热处理对成形件组织和硬度的影响。结果表明:去应力退火后,成形件组织和显微硬度基本无变化;固溶+时效热处理后,原沉积态明暗两区统一,硬度基本无差别,表明组织已均匀化。随着固溶温度的升高,网篮组织中的 $\alpha$ 片变宽,球状 $\alpha$ 相的数量增多,晶界 $\alpha$ 相发生粗化。当固溶温度为 932℃时,成形件沉积态中粗大的柱状晶发生再结晶,转变为较细小的等轴晶。

**关键词:** TC21 钛合金 激光快速成形 热处理 显微组织 显微硬度

**[ABSTRACT]** With the aid of laser rapid forming (LRF) technique, the TC21 alloy samples are prepared. From the viewpoint of microhardness and microstructure, the effects of stress relief annealing and solution aging are investigated by the means of modern analyzing and testing analysis. The results show that two different microstructure areas existed in the as deposited TC21 alloy are bright area and dark area. After stress relief annealing, the difference mentioned above is not disappeared. Whereas after solution aging, the difference mentioned above is disappeared. Since the microstructure is homogenized, there is no difference in hardness between the microhardness of bright area and dark area. With the solution temperature rising, the width of  $\alpha$  lath, the ratio of globular  $\alpha$  and the size of grain boundary  $\alpha$  increase. When the temperature rises to 932 °C, recrystallization happens and results in equiaxed grains transformed from coarse columnar grains existed in as deposited LRF TC21 alloy.

**Keywords:** TC21 titanium alloy Laser rapid forming Heat treatment Microstructure Microhardness

激光加工技术是 20 世纪 70 年代随着工业用大功率激光器的不断问世而发展起来的高新技术,具有流程短、能耗低、柔性高、环境友好、成形与组织性能控制

一体化等优点。激光快速成形技术的出现,大大缩短了零件从结构设计到实体制造的研发周期,是一种能够对设计实现快速响应的柔性化程度高的先进制造技术,尤其适用于材料成本高昂、加工困难的钛合金、高温合金结构件<sup>[1-3]</sup>。为了适应航空用结构钛合金的发展需要,西北有色金属研究院于 2003 年设计开发出一种 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Cr-Nb-Si 八元系的( $\alpha + \beta$ )两相钛合金 TC21。这种 TC21 钛合金的各种性能都非常稳定,抗拉强度可达 1100MPa,抗剪强度可达 700MPa、断裂韧性高达 70MPa·m<sup>1/2</sup>、裂纹扩展速率低至  $2 \times 10^{-5}$ mm/cycle,具有强度、塑性、断裂韧性、裂纹扩展速率的良好匹配<sup>[4]</sup>。作为一种有广阔应用前景的高强度高韧损伤容限型结构钛合金,TC21 钛合金当前在飞机上应用的部位主要包括:前翼梁、水平尾翼旋转体、发动机框架和下龙骨弦杆等,是使用量最大的两种钛合金之一<sup>[5-8]</sup>。

激光快速成形钛合金零件要在航空上得到广泛应用,目前存在的重要问题之一就是如何通过组织控制来获取成形件所需的力学性能。在激光快速成形中,一方面,其近快速熔凝过程不可避免地在成形件中产生较大的残余应力;另一方面,获得的沉积态组织往往并不是最优化的组织<sup>[9-11]</sup>。有研究结果指出,TC21 合金在退火状态下强度较高塑性较低,经固溶+时效处理能提高该合金的强度,但是随着固溶温度的升高,由于 $\beta$ 转变组织中出现较多的块状次生 $\alpha$ 相,导致材料塑性下降。鉴于此,本文在实验的基础上,研究去应力退火及固溶时效热处理对 TC21 钛合金激光快速成形试样的组织和显微硬度的影响规律,以期为后续力学性能的优化和控制奠定科学基础。

## 1 试验

本试验是在西北工业大学凝固技术国家重点实验室建立的激光快速成形系统上完成的,该系统由 RS-850 型 5kW CO<sub>2</sub> 激光器、LPM-408 四轴联动数控工作台、JPSF-2 型高精度可调自动送粉器、侧向送粉喷嘴等集成。试验所使用的粉末材料为球形及非球形粉,粒度为 -100 目,成形前经真空烘干。基材为纯钛板,打磨去除

氧化膜后采用丙酮清洗。表1所示为激光快速成形制备 TC21 块状坯料试验所用工艺参数。

表1 激光快速成形TC21组织工艺参数

激光功率 /kW	扫描速度 / (mm·min <sup>-1</sup> )	送粉率 / (g·min <sup>-1</sup> )	加工点光斑尺寸/mm
1.5~3	300	2~3	3

线切割激光直接沉积部分,使用 SX-4-10 箱式电阻炉对激光成形 TC21 坯料进行热处理,热处理制度如表2所示。分别制备 TC21 沉积态试样及热处理试样,利用 OLYMPUS PM-T3 光学显微镜(OM)、HITACHI S570 型扫描电子显微镜(SEM)、PANalytical X'Pert PRO 型 X 射线衍射(XRD)对试样进行显微组织观察。利用 HBV-30A 型数显显微硬度(维氏压头)进行显微硬度测试。

表2 激光快速成形TC21试样热处理制度

热处理制度	备注
600℃ × 1h, AC	去应力退火
850℃ × 1h, AC + 600℃ × 4h, AC	固溶时效
900℃ × 1h, AC + 600℃ × 4h, AC	固溶时效
932℃ × 1h, AC + 600℃ × 4h, AC	固溶时效

## 2 结果与讨论

### 2.1 激光成形 TC21 钛合金沉积态组织特征

基于激光快速成形过程中的外延生长特性和状晶/等轴晶转变特点,激光快速成形 TC21 钛合金沉积态组织主要由沿沉积高度方向生长的贯穿多个熔覆层的粗大柱状晶组成,仅最后一层熔覆层(即成形试样的顶部)晶粒为较小的等轴晶,如图1(a)所示。在激光快速成形时,熔点附近的冷却速度可达 10<sup>3</sup>℃/s 量级,在  $\beta$  及  $\alpha$  相区的冷却速度也远大于 18℃/s,因此  $\beta$  相结构会通过无扩散切变形式生成马氏体  $\alpha'$  相。钛合金马氏体

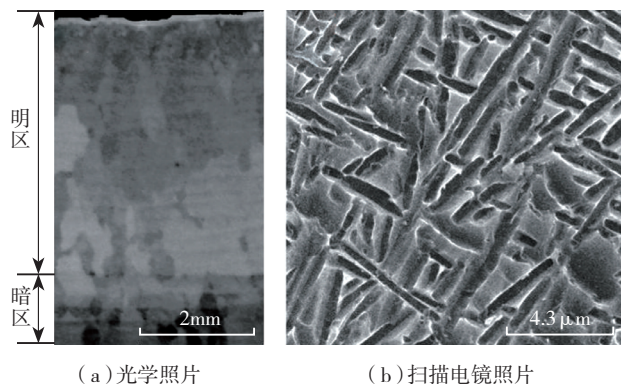


图1 TC21沉积态试样组织

Fig.1 As-deposited microstructure of TC21 sample

相变动力学特点是瞬间形核长大,降温持续进行,当碰到马氏体终止析出线  $M_f$ , 马氏体形成结束,继续降温直至室温也不再发生组织变化。

在激光快速成形过程中,成形件上某一点经受往复热循环,即当第  $N$  层上激光沉积当前层时,受往复热循环作用当前层以下部分相当于进行了回火或时效热处理,因而发生组织演化,进而影响到力学性能。图1(a)中的暗区为马氏体受热演变后形成的细密编织网篮组织,图1(b)暗区 SEM 照片证实了这一点;马氏体仅存在于最上面的十几层,金相显微镜下显示为图1(b)中的明亮区域。

### 2.2 热处理对激光成形 TC21 钛合金组织的影响

#### 2.2.1 宏观组织形态

图2给出了激光功率为 3kW 时成形试样热处理后的宏观组织形貌,从中可以看出,经表2所列4种制度热处理后,暗区中依然可以观察到层带现象,而明区中层带已经很难分辨。LRF 试样分别经 850℃ × 1h, AC+600℃ × 4h, AC 和 900℃ × 1h, AC+600℃ × 4h, AC 的固溶+时效处理后,柱状晶还存在,但经 932℃ × 1h, AC+600℃ × 4h, AC 的固溶+时效处理后,柱状晶为等轴晶所取代。这是因为激光快速成形过程中,高速冷却造成的结构、成分、应力等的不均衡,会引起较高的组织转变驱动力,与塑性变形一样,当加热温度达到合金的再结晶温度后,就会发生再结晶。然而,相对于塑性变形来说,激光快速成形 TC21 的再结晶驱动力要小得多,因此只有当固溶温度较高时(例如本文研究中 932℃),才发生了再结晶,由柱状晶组成的沉积态组织转变为由等轴晶组成的固溶时效组织,如图2(d)所示。并且随着固溶温度的升高,加之氧元素扩散的影响,原沉积态熔覆层的等轴晶层厚度增大。

#### 2.2.2 微观组织形态

进一步对热处理试样明暗区组织进行高倍金相观察,结果如图3所示。经 600℃ × 1h, AC 去应力退火处理后,因加热温度较低,组织中仅发生了空位浓度下降及多边化,应力得到释放,但基本不存在成分和组织变化,因此,经去应力退火后,仍然可观察到与沉积态相同的明暗区的差别。明区的组织依然难以辨认,如图3(a)中上图;而暗区组织仍然为网篮状,图3(a)中下图,网篮组织的形态相对于沉积态变化不大。经固溶+时效处理后,原沉积态明区组织中的针状马氏体  $\alpha'$  相消失,无论是原沉积态的明区还是暗区,都转变为统一的如图3(b)~3(d)所示的细密编织网篮组织,其组织中的  $\alpha$  片宽度相对沉积态和去应力退火态有所增加,并有等轴  $\alpha$  相析出,呈现出由等轴  $\alpha$ 、网篮  $\alpha$  和转变  $\beta$  相的双态组织特征,同时晶界处也有  $\alpha$  相的析出。固溶温度越高,

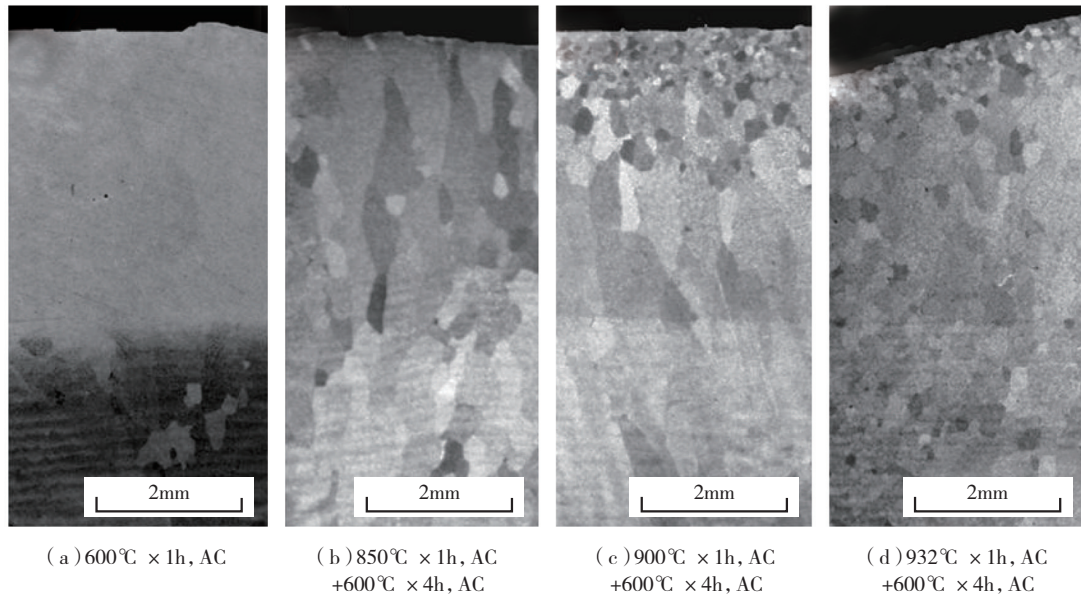


图2 热处理后的激光快速成形TC21合金宏观组织  
 Fig.2 Macrostructures of laser formed TC21 alloy after heat treatment

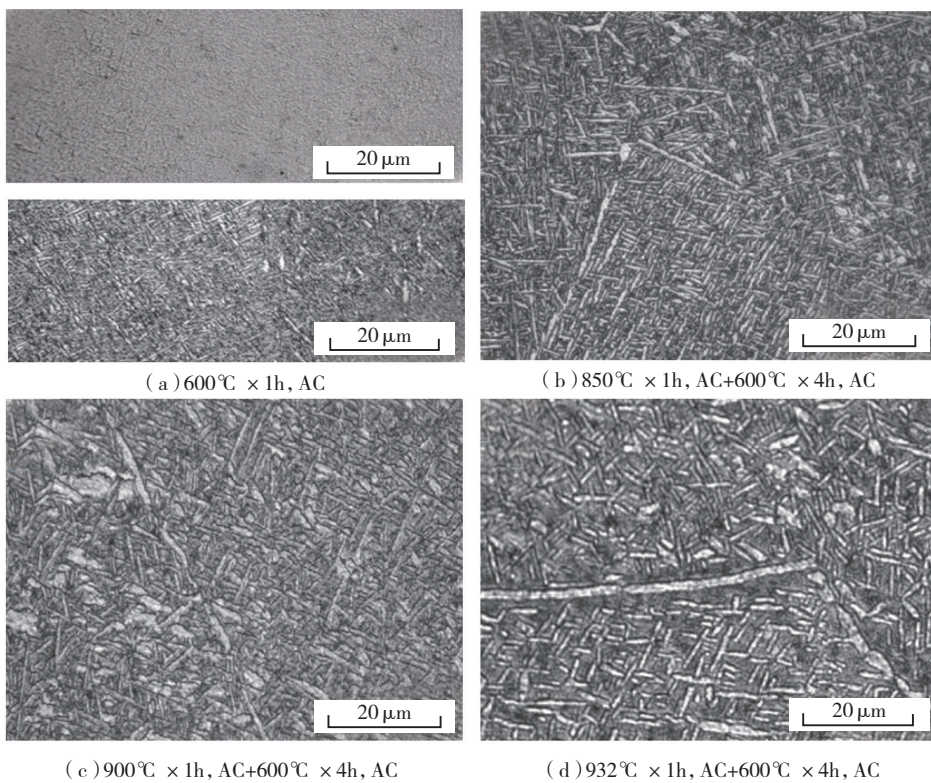


图3 热处理后的激光快速成形TC21合金微观组织  
 Fig.3 Microstructures of laser formed TC21 alloy after heat treatment

网篮组织中的β片宽度越大,球状α相的数量也越多,经932°C × 1h, AC+600°C × 4h, AC热处理后,球状α相的体积分数达到约10%。N. Stefansson<sup>[12-13]</sup>在对TC4的研究中发现类似现象,他认为激光快速成形过程中具

有较高的组织转变驱动力,温度越高,晶界分裂造成片状组织分离的进程越快,因此在固溶+时效的热处理后,出现α相粗化和部分组织球化的现象就不难理解。并且,随着固溶温度升高,晶界α的宽度也在增加。

出现上述现象的原因是经较高固溶温度处理后,亚稳且过饱和的马氏体相的结构和成分会朝着低能量的稳定状态变化,即亚稳β相发生组织转变,伴随着α相从β相基体上析出,固溶后快冷使初生的α及其残留的β相得以保留。然后在520°C时效4h空冷处理,亚稳的β相会发生分解成为弥散的α+β相。

图4所示2幅XRD谱线相似,表明TC21合金激光成形件沉积态暗区相组成与850°C × 1h, AC+600°C × 4h

固溶+时效热处理态相组成相同。这印证了固溶时效热处理对明暗区组织的趋同化影响。

### 2.3 热处理对激光快速成形TC21显微硬度的影响

经去应力退火后,TC21成形件宏观上依然保持

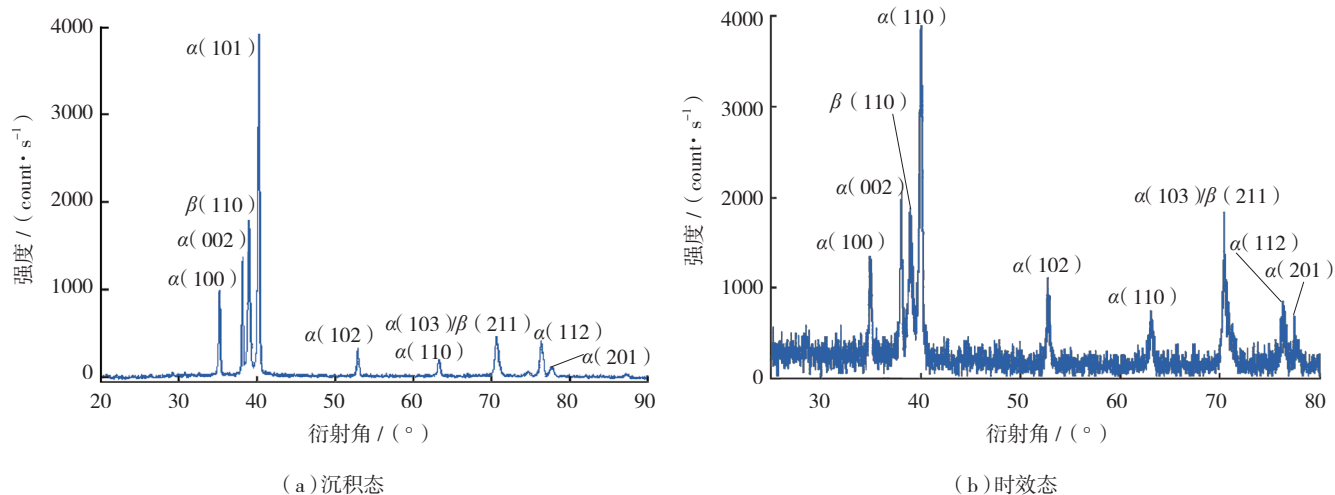


图4 沉积态暗区与850℃×1h, AC+600℃×4h热处理态TC21成形件的XRD谱线对比  
Fig.4 XRD images of dark zone of as-deposited sample and heat treated sample

明暗区组织特征,其力学性能也将变化很少;而经固溶+时效处理后,成形件的明暗区差别消失,组织趋于统一,因此硬度也将变得均匀一致。图5对比给出了经600℃×1h, AC的去应力退火和900℃×1h, AC+600℃×4h, AC的固溶+时效2种热处理后的显微硬度,可以看出,成形件在热处理后,硬度的变化与组织的变化是一致的:去应力退火后,明区的硬度依然高于暗区,高出约90HV,与沉积态明暗区硬度差异相当。而经固溶+时效后,明区与暗区的硬度差别消失,固溶+时效处理后的硬度与去应力退火后暗区的硬度相近,差值不超过10HV。此外,经固溶+时效后,由于弥散相的固溶强化作用,成形件的硬度较沉积态暗区硬度有所提高。

一般认为,对于双相钛合金来说, $\alpha$ 相主要是较低硬度的Al原子富集,而 $\beta$ 相主要是具有较高硬度的Nd、Mo、Si等富集,所以过饱和亚稳 $\beta$ 相的固溶强化效

果较显著,马氏体 $\alpha'$ 相因其 $\beta$ 稳定元素富集而硬度较高。 $\alpha$ 片层较之针状马氏体 $\alpha'$ 相粗大, $\beta$ 相所占相对面积比例减少,所以马氏体 $\alpha'$ 相的硬度高于 $\alpha$ 片层的硬度。去应力退火并未改变成形件的组织 and 力学性能,故存在于沉积态中的马氏体明区和网篮组织暗区以及较大的硬度差异。

而固溶后马氏体 $\alpha'$ 及少量的亚稳定 $\beta$ 相得以保留,之后的时效处理,使亚稳定相按一定的方式分解成稳定的弥散的 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相。经固溶+时效处理后,存在于原沉积态中的明暗区差别消失,组织变得统一,试样性能也更加均匀。并且,由于弥散相的固溶强化作用,试样的硬度有所提高。固溶+时效处理后的硬度与去应力退火后暗区的硬度相近。

### 3 结束语

(1) 经600℃×1h, AC的去应力退火处理后,因加热温度较低,组织中仅发生了空位浓度下降及多边化,应力得到释放,但基本不存在成分和组织变化,马氏体明区和网篮组织暗区分界明显,明区和暗区的硬度差别高至90HV。

(2) 经固溶+时效处理后,金相观察及XRD分析显示明暗区差别消失,组织趋同,具有双态组织特征,成形件硬度也变得均匀,原明暗区硬度差别不超过10HV。并且,由于弥散相的固溶强化作用,试样的硬度较沉积态暗区有所提高。固溶温度为850℃和900℃时,原始 $\beta$ 柱状晶仍然存在,但固溶温度为932℃时,柱状晶会被等轴晶所取代。固溶温度越高,组织中 $\alpha$ 片的宽度越大,球状 $\alpha$ 相的数量也越多,晶界 $\alpha$ 的宽度也在增加并变得连续。

(下转第82页)

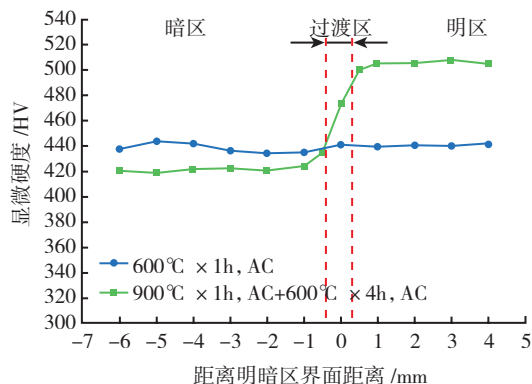


图5 TC21合金成形件经不同热处理后的显微硬度  
Fig.5 Microhardness of laser formed TC21 alloy sample after different heat treatment

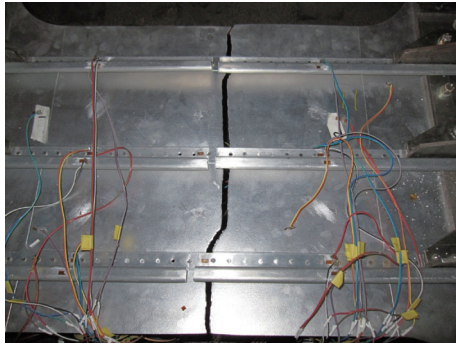


图1 钣金长桁壁板拉伸试验破坏形式  
Fig.1 Test broken form of panel with forming stringers

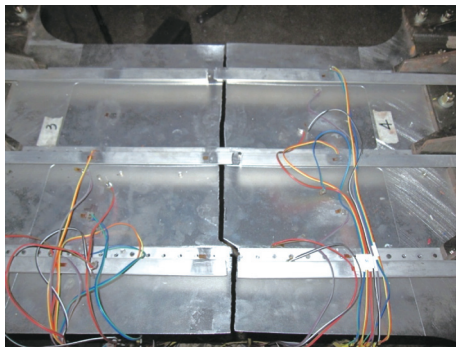


图2 挤压长桁壁板拉伸试验破坏形式  
Fig.2 Test broken form of panel with extrusion stringers

表2 两种构型壁板的拉伸破坏载荷

试验件类型	破坏载荷 /kN	加载端位移 /mm
钣金长桁	494.408	20.136
挤压长桁	567.719	16.548

生断裂导致承载能力大幅下降时的载荷。

#### 4 试验结果分析

由表2可以看出,挤压长桁的破坏载荷明显大于钣金长桁,但挤压长桁的加载端位移明显小于钣金长桁。因此,钣金长桁较挤压长桁而言有更好的延展性,但挤压长桁的蒙皮壁板在轴向拉伸载荷下有更好的承载能力。

#### 5 结论

通过有限元计算及试验验证结果可看出,拉伸载荷下铝锂合金挤压长桁构型壁板的破坏载荷比7000系列铝合金钣金长桁构型壁板破坏载荷提高10%以上。由于两种构型壁板长桁的截面积相同,考虑铝锂合金材料的低密度特性,采用铝锂合金挤压长桁的机身壁板可以提高抗拉能力和减重的双重效果。

#### 参考文献

- [1] 牛春匀. 实用飞机结构工程设计. 航空工业出版社, 2008.  
[2] Niu Chunyun. Airframe Stress Analysis and Sizing. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press Ltd, 1988. (责编 可岚)

(上接第69页)

- Radiation Physics and Chemistry, 1995, 46(4-6): 863-866.  
[19] Snead C L, Morena J J, Czajkowski C J, et al. Mechanical-property changes of polymeric and composite materials after low-temperature proton irradiation. Materials Characterization, 1999, 42: 73-91.  
[20] Mishra R, Tripathy S P, et al. Optical and electrical properties of some electron and proton irradiated polymers. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2000, 168: 59-64.  
[21] Gao Y, Jiang S P, Yang D Z, et al. A study on radiation effect of < 200 keV protons on M40J/Epoxy composites. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research - Section B, 2005, 229(2): 261-268.  
[22] Gao Y, Jiang S L, Dong S L, et al. Effect of 120 keV proton irradiation on mass loss and chemical structure of AG-80 epoxy resin. Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology, 2010, 165(11): 857-867. (责编 小城)

(上接第73页)

#### 参考文献

- [1] 关振中. 激光加工工艺手册. 北京: 中国计量出版社, 1998: 1-2.  
[2] 林鑫, 薛蕾, 陈静, 等. 钛合金零件的激光成形修复. 快速制造技术, 2010(8): 55-56.  
[3] 曹春晓. 航空用钛合金的发展概况. 航空科学技术, 2005, (4): 3-6.  
[4] 曲恒磊, 赵永庆, 朱知寿. 一种高强韧钛合金及其加工方法: 中国, 03105965.1 [P]. 2003-09-30.  
[5] Qu H L, Zhou Y G, Zhou L, et al. Relationship among forging technology, structure and properties of TC21 alloy bars. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005, 15(5): 1120-1124.  
[6] 赵永庆, 曲恒磊, 冯亮, 等. 高强高韧损伤容限型钛合金TC21研制. 钛工业进展, 2004, 21(1): 22-24.  
[7] 张颖楠, 李辉, 曲恒磊, 等. Ti-22-22S合金的研究进展. 金属热处理, 2002, 27(12): 14-16.  
[8] 张民. 热处理对TC21钛合金组织和性能的影响[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.  
[9] Joseph M C. Advances in powder metallurgy processing. Advanced Materials and Processes, 1999, 156(3): 33-36.  
[10] Richard M. Directed light fabrication. Advanced Materials & Processes, 1997, 151(3): 31-33.  
[11] Griffith M L, Schlienger M E. Understanding thermal behavior in the LENS process. Materials and Design, 1999, 20(2/3): 108-109.  
[12] Abbott D, Arcella F. Laser forming titanium components. Advanced Materials & Processes, 1998(5): 29-30.  
[13] Stefansson N, Semiatin S L. Mechanisms of globularization of Ti-6Al-4V during static heat treatment. Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, 34A: 691-698.

(责编 小城 深蓝 夏宛)