

改造 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/TC11 双合金焊缝组织与增强连接界面性能的工艺

高 峻, 姚泽坤, 刘莹莹, 郭鸿镇, 杨航航

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘 要: 研究近等温锻造+梯度热处理工艺对 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/TC11 双合金焊接接头的显微硬度变化、合金元素扩散趋势、显微组织特征和拉伸性能的影响。结果表明: 近等温锻造+梯度热处理能使焊接接头得到强化。经近等温锻造和梯度热处理后焊缝熔合区形成的马氏体 α' 和 α'' 相分解为 $\alpha(\alpha_2)+\beta$ 的平衡组织; TC11 合金热影响区的魏氏组织转变为网篮组织; 试样具有良好的 500 °C 高温综合性能(σ_b : 840 MPa, δ : 18.5%, ψ : 65%)。

关键词: Ti-24Al-15Nb-1.5Mo 合金; TC11 合金; 双合金; 近等温锻造; 梯度热处理

中图法分类号: TG32, TG113.25

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)11-2043-05

近年来, 针对航空发动机压气机、涡轮工作温度提高, 应力增大的发展趋势^[1], 国内外许多学者展开了对双组织-双性能盘和双合金-双性能盘的研究。目前, 制造双组织盘的工艺技术主要有组合制坯加等温锻造、形变热处理和梯度热处理等方法^[2]。相比双组织盘, 双合金盘采用两种分别满足轮毂和轮芯的材料通过连接+界面强化的方法成形, 在设计上能够更大程度发挥 2 种合金各自的性能优势, 能够在更大的应力梯度和温度梯度下工作^[3~5]。

与普通熔焊相比, 电子束焊接虽然具有能量密度高、加热范围窄、加热冷却速度极快、熔池体积小、焊缝窄而深、热影响区小等优点。但依然无法避免在热影响区发生晶粒长大和熔合区形成凝固组织, 导致焊接接头塑性和韧性降低^[6~12], 使其成为双合金技术应用的瓶颈。针对上述问题, 本实验深入研究了近等温锻造+梯度热处理对双合金接头微观结构的影响, 测试双合金连接界面显微硬度, 观察显微组织的特征、探讨组织演化机制。这对改造双合金焊缝的组织, 增强性能, 推动双合金技术的应用与发展具有重要的理论及现实意义。

1 实 验

试验材料是由北京航空材料研究院提供的 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo 合金轧制棒, 其名义成分(at%)为: 24Al, 15Nb, 1.5Mo, Ti 基, β 转变温度是 1100 °C。

$\phi 42$ mm TC11 合金棒材由宝鸡有色金属加工厂

生产, 其名义成分(质量分数%)为: 5.8~7.0Al, 2.8~3.8Mo, 0.8~2.5Zr, 0.2~0.35Si, Ti 基, β 转变温度是 1000 °C。

在空气锤上将 TC11 合金改锻成 $\phi 20$ mm 圆棒, 改锻加热温度为 980 °C。Ti-24Al-15Nb-1.5Mo 合金也改锻成 $\phi 20$ mm 圆棒, 改锻加热温度为 1080 °C。

焊接前, 将 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo 合金试样切成 30 mm 长, TC11 合金试样切成 36 mm 长; 待焊端面用砂纸打磨后清洗干净。焊接实验是在德国制造的 EBOCAM KS55-G150-CNC 真空焊接机上完成的, 采用的焊接电压为 150 kV, 焊接电流为 18 mA, 聚焦电流为 2030 mA, 焊接速度为 10~12 mm/s。

焊接好的试样表面涂以 FR21 玻璃防护润滑剂, 在 6300 kN 可控应变速率液压机上进行近等温压缩试验。锻造过程中模具温度保持 900 °C。试样沿轴向进行侧压, 坯料的锻造加热温度 980 °C, 变形量 40%, 应变速率 10^{-3}s^{-1} 。由于 2 种合金的热处理制度不同, 所以采用了如下梯度热处理: 即 980 °C, 1 h AC (Ti-24Al-15Nb-1.5Mo 合金侧)/950 °C, 1 h AC (TC11 合金侧) + 815 °C, 1 h (Ti-24Al-15Nb-1.5Mo 合金侧)/450 °C, 1 h (TC11 合金侧), AC; 紧跟着进行 700 °C, 7 h (Ti-24Al-15Nb-1.5Mo 合金侧)/530 °C, 7 h (TC11 合金侧), AC 的时效处理。连接界面进行显微硬度测试和金相观察, 进行显微硬度测定时, 试验载荷 1 N, 加载时间 15 s。元素扩散定性与定量分析是在牛津公司生产的 INCA-7718 型能谱仪上进行。

收稿日期: 2008-11-09

基金项目: 国家自然科学基金资助(50775187)

作者简介: 高 峻, 男, 1980 年生, 硕士, 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88492642, E-mail: gaojun@mail.nwpu.edu.cn

2 结果与讨论

2.1 焊缝显微硬度的变化规律

图 1 是双合金焊件的焊缝区显微硬度曲线。从图 1 可发现,与直接焊接件对比,经近等温锻造但未热处理的双合金接头的显微硬度分布发生了显著的变化。从 TC11 合金基体到 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo 合金基体的焊缝区内显微硬度整体降低到 3500 MPa 以下,显微硬度波动分别发生在原焊缝熔化区与两侧未熔区交界处,熔合区与 TC11 合金交接处显微硬度最低,仅 3058 MPa,而与 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo 合金交接区内显微硬度最高,达到 4875 MPa。经过梯度热处理后,熔合区与 TC11 合金交界处的显微硬度基本恢复到焊态水平,但在熔合区与 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo 合金的交接处显微硬度略微下降,且波动幅度显著减小。

2.2 焊缝微观组织的变化规律

TC11 合金母材在室温下的组织为少量等轴 α 相点缀分布于层片状 β 转变组织基体上(见图 2a), Ti-24Al-15Nb-1.5Mo 合金母材在室温下的组织为等轴 α_2 相和 B_2 相的机械混合物(见图 2b)。

从焊态的接头组织可看出,焊缝熔合区为典型的铸态混合组织(图 3b),空位密度较高,结晶的枝晶表层合金化程度高,因而使焊缝处硬度较高,同时,波动幅度也较大。由于焊接时熔化区两侧热影响区的温度高于 β 转变温度,冷却又相对较慢,所以在两侧热影响区的晶粒长得特别粗大。TC11 合金热影响区的 β 晶界基本可见,针状的 α 束平行分布于 β 晶粒之

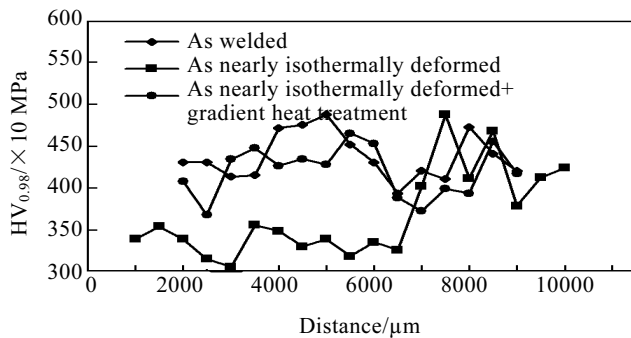


图 1 不同状态的双合金焊件的焊缝区显微硬度曲线

Fig. 1 Micro-hardness of different states Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/TC11 alloy weld samples: (TC11 (left)→Ti-24Al-15Nb-1.5Mo (right), starting point 4250 μm → end point (No.1: 5750 μm ; No.2: 6550 μm ; No.3: 5750 μm))

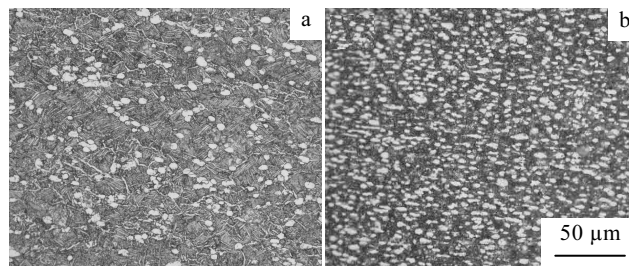


图 2 母材的原始组织

Fig.2 Original microstructure of base metal: (a) TC11 alloy and (b)Ti-24Al-15Nb-1.5Mo alloy

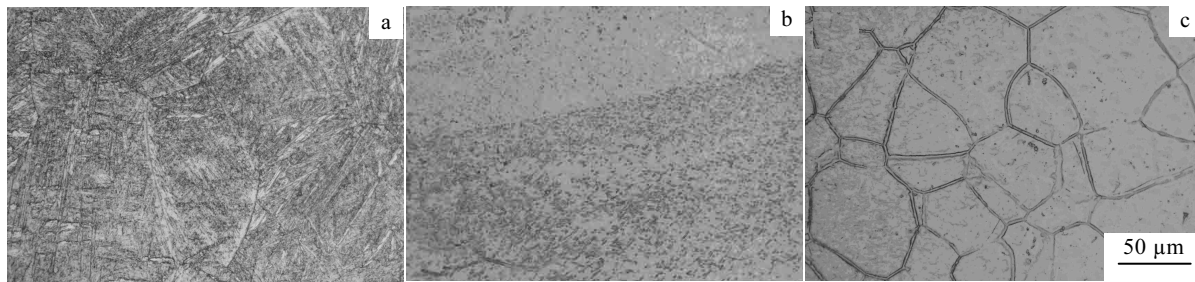


图 3 焊接后焊接接头的微观组织

Fig. 3 Microstructure in welded joint: (a) heat effect zone (TC11), (b) fusion zone, and (c) heat effect zone (Ti-24Al-15Nb-1.5Mo)

内(见图 3a)。Ti-24Al-15Nb-1.5Mo 合金热影响区内的 β 晶界十分清晰, α_2 相已基本溶解于 β 晶内(见图 3c)。

焊件在 980 $^{\circ}\text{C}$, 即 $\alpha_2+\beta$ 两相区和 $\alpha+\beta$ 两相区进行近等温锻造,在热力作用下合金发生塑性变形,枝晶断裂、破碎,并伴随着动态再结晶,使得空位、位错

等缺陷得以消除,畸变能得以释放,合金元素得到初步扩散,使得合金的硬度降低,均匀性得以改善。熔合区的组织形态发生显著变化,原来的铸态组织转变为密集的针状组织,许多细小的 α 和 α_2 相析出(图 4b)。TC11 合金侧热影响区在锻后转变为网篮组织与魏氏组织的混合组织(图 4a),细长的 α 片条随机排列;锻

造后,由于试件获得一定的畸变能使 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo 合金侧热影响区发生了明显的再结晶, β 晶粒细化,晶界变薄,同时有 α_2 相在晶内和晶界处析出(见图4c)。

近等温锻造的试样进行梯度热处理后,TC11合金热影响区内的魏氏组织转变为网篮状的 $\alpha+\beta$ 组织, α 片有所变厚(见图5a)。从图4b可以看出,焊区组织的形貌在热处理后也发生了一定的变化,光学显微镜下发现在近等温锻造的试样内的细针状物消失,取而代之的是细小颗粒状的 α 相和 α_2 相(图5b)。这可能是焊接遗留的 α' 相、 α'' 相和固溶时形成的过饱和 β 相在时效过程中发生分解,生成了弥散的 α 、 α_2 相。Ti-24Al-15Nb-1.5Mo合金侧热影响区的晶粒略有长大,但整体形貌基本没有发生变化(图5c),所以该区的显微硬度变化不大。

2.3 焊缝区合金元素的扩散规律

图6为通过焊缝的区域及其合金元素电子探针扫描线。从图中可以看出,在焊缝的熔化区与两侧未熔化的基体金属交界处,合金元素含量发生突变,这是因为焊接界面两侧元素的浓度相差较大,而电子束焊接的熔合区小,冷却速度相对较快,仅靠焊接热作用难以启动元素扩散,这从试样处理前后测得的焊缝熔

合区内3点的各元素含量变化可以发现(见表1),焊件经近等温锻造和热处理后合金元素发生了明显的扩散,元素Nb的含量降低约4%,Al降低约1%。元素Ti、Al、Nb是分别从高浓度向低浓度处扩散。近等温锻造变形量越大,晶格畸变能愈高,合金元素获得的能量增加,越易挣脱晶格点阵的束缚,使得元素愈容易扩散。同时熔合区的针状马氏体 α' 和 α'' 在近等温锻造时被剪断,获得更多相界,使得合金元素扩散通道增加,阻力降低,这些因素皆有利于合金元素的扩散,使得试样在锻造和热处理后合金元素扩散扫描线呈连续上升或下降势态。

2.4 焊接接头的拉伸性能

表2为焊接连接的双合金经近等温变形+梯度热处理后的拉伸性能数据。从表中可以看出,经40%变形的试样的室温强度较高,塑性较低;但却表现出良好的高温拉伸性能,其500℃抗拉强度为840 MPa,延伸率为18.5%,断面收缩率为65%。这说明较大的近等温变形有利于提高双合金接头的高温强度和塑性。从断口扫描电镜照片可以看出,室温拉伸试件断口起伏稍大,沿放射方向可以观察到人字纹花样(图7a),断定裂纹起始于试样表面。断口上的韧窝很少,其形貌为

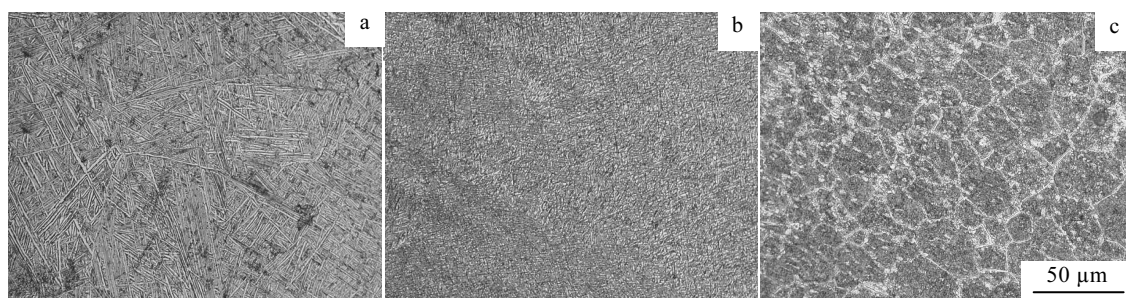


图4 焊接接头经近等温锻造后的微观组织

Fig. 4 Microstructure of welded joint after near isothermal forging: (a) heat effect zone (TC11), (b) fusion zone, and (c) heat effect zone (Ti-24Al-15Nb-1.5Mo)

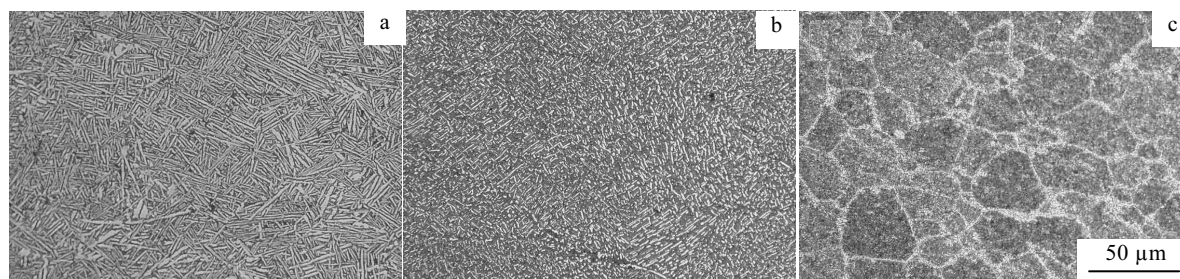


图5 焊接接头经近等温变形+梯度热处理后的微观组织

Fig. 5 Microstructure of joint after near isothermal forging and gradient heat treating: (a) heat effect zone (TC11), (b) fusion zone, and (c) heat effect zone (Ti-24Al-15Nb-1.5Mo)

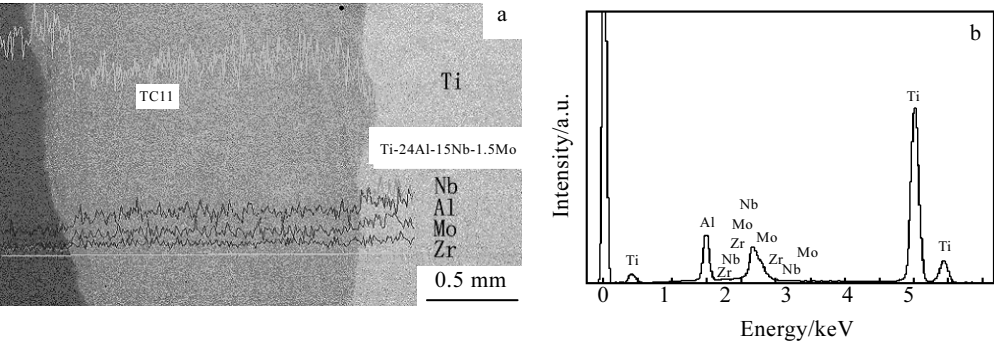


图 6 焊缝区组织合金元素扩散的电子探针分析

Fig.6 Microstructure (a) and electronic probe analyzing (b) for weld seam zone

表 1 焊接接头处理前后熔合区不同位置的元素含量

Table 1 The content of elements in different sites of FZ of welding seam ($\omega/\%$)

Element	As welded			As welded + forged + heat treated		
	-500 μm	0	+500 μm	-500 μm	0	+500 μm
Al	9.14	9.15	8.76	8.05	7.78	8.30
Ti	70.62	70.07	71.48	75.36	74.10	75.84
Zr	0.73	0.97	0.84	1.02	0.70	1.34
Nb	17.51	17.14	16.20	12.67	14.22	11.63
Mo	2.01	2.68	2.72	2.90	3.21	2.89

表 2 双合金焊件经近等温变形40%和梯度热处理后的拉伸性能数据

Table 2 Tensile properties of dual alloy joints after near isothermal deforming 40% and gradient heat treating

Room temperature				500 $^{\circ}\text{C}$			
σ/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta/\%$	$\psi/\%$	σ/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta/\%$	$\psi/\%$
1140	1100	1.5	2.4	840	665	18.5	65

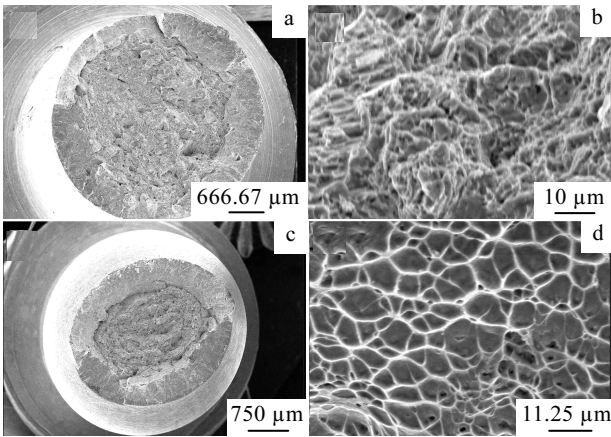


图 7 经近等温锻造+梯度热处理的双合金拉伸断口形貌

Fig.7 The fracture morphologies of dual alloy joints after nearly isothermal deforming and gradient heat treating: (a, b) RT and (c, d) 500 $^{\circ}\text{C}$

典型的河流花样(图 7b),显示其为解理性断裂。500 $^{\circ}\text{C}$ 高温拉伸时,宏观断口由约有 2/5 的剪切唇和 3/5 的撕裂区组成,撕裂区中放射区和纤维区的比例为 1:1(图 7c),为韧性断裂。放射区面积比例较小,剪切唇和纤维区面积比例较大,故塑性较好^[5]。断口微观形貌的主要特征是大小较均匀的等轴韧窝(图 7d),部分韧窝中有第二相粒子出现,第二相粒子能够阻碍裂纹的扩展,在一定程度上提高了合金的高温抗拉伸强度。

双合金试样高温拉伸时断开于 TC11 合金基体,这也从侧面证明了 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/TC11 双合金经近等温锻造和梯度热处理后,焊接接头 500 $^{\circ}\text{C}$ 的强度水平高于 TC11 合金母材。这说明通过较大的近等温变形和梯度热处理可以提高双合金焊接界面的抗拉伸强度和 500 $^{\circ}\text{C}$ 高温抗拉伸性能。

3 结 论

1) 经近等温锻造+梯度热处理后,焊缝熔合区的铸态组织转变为 β 基体上弥散分布着 α 和 α_2 相的混合组织;TC11 合金热影响区内的魏氏组织转变为网篮组织。

2) 近等温锻造细化了晶粒,增加了焊缝的晶界,同时,熔合区的针状马氏体 α' 和 α'' 在近等温锻造时被切断,Al、Nb 等元素发生了明显的扩散。

3) 近等温锻造+梯度热处理可使 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/TC11 双合金焊接接头得到强化,使焊缝的显微硬度均匀化,并使其获得良好的高温拉伸性能。较大的近等温锻造变形有利于提高接头的高温强度和塑性。

参考文献 References

- [1] Tian Shifan(田世藩), Zhang Guoqing(张国庆), Li Zhou(李周) *et al.* *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2003, 23(S): 233
- [2] Liu Yingying(刘莹莹), Yao Zekun(姚泽坤), Guo Hongzhe(郭鸿镇). *Material Review*(材料导报) [J], 2007, 21(12): 95
- [3] John Gayda, David Furrer. *Advanced Materials & Processes*[J], 2003(10): 36
- [4] Yao Zekun(姚泽坤), Liang Xingmin(梁新民), Guo Hongzhe(郭鸿镇) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(6): 907
- [5] Gao Jun(高 峻), Yao Zekun(姚泽坤), Liang Xingmin(梁新民). *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2008, 28(2): 14
- [6] Zhang Binggang(张秉刚), Feng Jicai(冯吉才), Wu Lin(吴林) *et al.* *Welding*(焊接)[J], 2004(5): 14
- [7] Shi Y W, Zhong F, Li X Y. *Materials Science*[J], 2007, 42(16): 6651
- [8] Wu Huiqiang(吴会强), Feng Jicai(冯吉才), He Jingshan(何景山). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2004, 25(5): 41
- [9] Cui Yuexian(崔约贤), Yang Dezhuang(杨德庄), Liu Bo(刘博) *et al.* *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 1998, 19 (S1): 130
- [10] Zhang Yonggang(张永刚), Han Yafang(韩雅芳), Chen Guoliang(陈国良) *et al.* *Structural Intermetallics*(金属间化合物结构材料)[M]. Beijing: Defence Industry Press, 2001: 799
- [11] Zhang H T, He P, Feng J C *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 425(1~2): 255
- [12] Wu Huiqiang(吴会强), Feng Jicai(冯吉才), He Peng(何 鹏) *et al.* *Aerospace Materials & Technology*(宇航材料工艺)[J], 2004 (5): 10

Craft of Improving Microstructure and Properties of Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/TC11 Dual Alloy Welding Joints

Gao Jun, Yao Zekun, Liu Yingying, Guo Hongzhen, Yang Hanghang
(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The effect of near isothermal forging and gradient heat treatment on the micro-hardness distribution, the trend of elements diffusion, the microstructure and tensile property have been investigated for the welding Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/TC11 dual alloys joint. The results show that the joint can be strengthened through near isothermal forging and gradient heat treatment. During heat working, the martensite α' phase and α'' phase in fusion zone of joint are broken up into a balance microstructure consisting of α (α_2) phase + β phase. The Widmanstatten structure changes into the basket weave structure in the alloy TC11 heat-affected zone of joint. In addition, the joint has excellent high temperature properties after near isothermal deformation and gradient heat treatment (σ_b is 840 MPa, δ is 18.5%, and ψ is 65%).

Key words: Ti-24Al-15Nb-1.5Mo alloy; TC11 alloy; dual alloy; near isothermal forging; gradient heat treatment

Biography: Gao Jun, Master, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88492642, E-mail: gaojun@mail.nwpu.edu.cn