

锻造工艺对 Ti-6Al-4V 合金大规格方坯组织与性能的影响

李瑞^{1,2}, 段晓辉², 岳旭², 王永强^{1,2}, 冯秋元^{1,2}, 欧笑笑², 刘宇舟²

(1. 宝钛集团有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

(2. 宝鸡钛业股份有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘要: 制定了3种 Ti-6Al-4V 合金大规格方坯锻造工艺, 通过 Simufact 仿真软件对工艺参数进行优化, 在万吨液压机上进行全流程控制锻造, 制备出规格为 245 mm × 480 mm × 3 700 mm 的大规格方坯。对方坯的力学性能和显微组织进行表征, 分析锻造工艺对大规格方坯组织与性能的影响。结果表明, 3种工艺锻制的 Ti-6Al-4V 合金大规格方坯显微组织均为等轴组织, 初生 α 相含量约占 80%。工艺 A 和工艺 B 制得的方坯组织细小, 均匀性好, 超声波杂波水平低。工艺 C 锻制的方坯晶粒粗大, 组织不均匀, 心部存在长条及大块状 α 相。工艺 A、B 锻制的方坯有较好的强度和塑性匹配, 工艺 C 锻制的方坯强度虽较高, 但塑性相对较低。从组织均匀性、力学性能及杂波水平综合考虑, 工艺 A 为最优锻造方案。

关键词: Ti-6Al-4V 合金; 全流程锻造; 大规格方坯

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2018)05-033-05

Effect of Forging Process on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy Large Forging Billet

Li Rui^{1,2}, Duan Xiaohui², Yue Xu², Wang Yongqiang^{1,2}, Feng Qiuyuan^{1,2}, Ou Xiaoxiao², Liu Yuzhou²

(1. Baoti Group Co., Ltd., Baoji 721014, China)

(2. Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: Three kinds of Ti-6Al-4V alloy large billet forging processes were developed. Optimization of process parameters by Simufact simulation software. The full-process forging was carried out on 10 000 ton hydraulic machine to prepare a large specification forging billet of 245 mm × 480 mm × 3 700 mm. The mechanical properties and microstructure of the large forging billet were characterized, and the effect of forging technology on the microstructure and mechanical properties of large forging billet was analyzed. The results show that the microstructures of large forging billet Ti-6Al-4V alloy are isoaxial, and the initial alpha phase content account for about 80%. The microstructures of forging billets forged by process A and process B are small and the uniformity is good, and the level of ultrasonic clutter is lower. The forging billet grain size of process C forging is large and uneven tissue, and there are long strips and large block alpha phases in the heart. The forging billets produced by process A and B have a good strength and plastic match. Although the strength of process C is high, but the plasticity is relatively low. Process A is the optimal scheme considering the tissue uniformity, mechanical properties and clutter level.

Key words: Ti-6Al-4V alloy; full-process forging; large forging billet

0 引言

Ti-6Al-4V 合金是一种 $\alpha + \beta$ 两相钛合金, 具有

良好的工艺塑性、超塑性、焊接性和耐腐蚀性能等优点, 被广泛应用于航空航天、舰船、医疗等领域。该合金具有较高的屈强比, 一般采用热加工成形, 锻造过程中的变形温度、变形量等工艺参数对合金组织及性能影响显著^[1]。

目前我国生产大规格方坯主要采用自由锻造方

收稿日期: 2018-07-23

通信作者: 李瑞(1988—), 男, 工程师。

式, 锻造火次往往超过 16 火, 这样制备的锻件性能虽可以满足标准要求, 但与国外产品相比, 批次稳定性较差, 成本偏高。为了得到高质量、高稳定性、低成本的产品, 可通过全流程控制锻造技术。在锻造设备上设置程序, 控制锻造工艺参数, 从而提高产品质量及稳定性, 减少锻造火次, 降低成本^[2-3]。本研究采用万吨液压机进行全流程控制锻造, 以 3 种不同的工艺分别制备 Ti-6Al-4V 合金大规格方坯, 对不同锻造工艺制备的大规格方坯进行力学性能、显微组织和超声波探伤检测, 探索合理的锻造工艺, 以得到工艺流程短、性能优良的 Ti-6Al-4V 合金大规格方坯。

1 实验

实验材料为经 3 次真空自耗电弧炉熔炼的 Ti-6Al-4V 合金铸锭, 规格为 $\phi 796$ mm, 低倍组织如图 1 所示, 化学成分符合 AMS 4928U 标准要求。采用金相法测得铸锭 β 相变点为 995 °C。

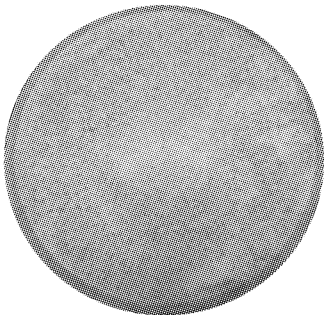


图 1 Ti-6Al-4V 合金铸锭低倍组织

Fig. 1 Macrostructure of Ti-6Al-4V alloy ingot

根据研制要求制定出 3 种锻造工艺, 利用 Simufact 软件进行计算机模拟, 根据计算结果输出的温度场与应变场, 分析并优化锻造工艺参数, 使得锻造过程中变形充分均匀。设置万吨液压机的道次压下量、压下速率、进给量及翻转角度等工艺参数, 使锻造过程在优化后的工艺参数下进行。相比于传统的自由锻造方式, 该锻造过程由液压机对坯料进行处理, 不仅可以避免操作者的人为作用, 还能保证产品尺寸准确度及工艺执行率, 确保产品具有良好的稳定性。制定的 3 种锻造工艺如下。

工艺 A: ①坯料加热至相变点以上较高温度, 进行 6 火自由锻(锻粗、拔长), 锻后水冷; ②加热至相变点以下 20~40 °C, 进行 4 火自由锻; ③加热至相变点以下 30~50 °C, 2 火锻造得到 245 mm ×

480 mm × 3 700 mm 方坯。工艺 A 共进行 12 火锻造。

工艺 B: ①坯料加热至相变点以上较高温度, 进行 5 火自由锻, 锻后水冷; ②加热至相变点以下 20~40 °C, 进行 1 火自由锻; ③加热至相变点以上较高温度, 进行 1 火自由锻, 锻后水冷; ④加热至相变点以下 20~40 °C, 出炉后进行 3 火自由锻; ⑤加热至相变点以下 30~50 °C, 2 火锻造得到 245 mm × 480 mm × 3 700 mm 方坯。工艺 B 共进行 12 火锻造。

工艺 C: ①坯料加热至相变点以上较高温度, 进行 5 火自由锻, 锻后水冷; ②加热至相变点以下 20~40 °C, 进行 3 火自由锻; ③加热至相变点以下 30~50 °C, 2 火次锻造得到 245 mm × 480 mm × 3 700 mm 方坯。工艺 C 共进行 10 火锻造。

Ti-6Al-4V 合金大规格方坯经 780 °C × 2 h/AC 退火后, 在其头部切取试样片, 沿边部、W/4 处(W 为方坯宽度)、心部切取横向与纵向金相试样, 用腐蚀液(5% HF + 10% HNO₃ + 85% H₂O) 腐蚀后, 采用 AXIOVERT 200MAT 金相显微镜进行显微组织观察。在方坯头、中、尾部切取试样块, 在试样块纵向(L)、横向(LT)和高向(ST)的 W/4 处各取 2 个力学性能试样, 采用 INSTRON 5885 拉伸试验机进行室温力学性能测试。按 AMS 4928U 标准要求, 采用 SONATEST 380M 型探伤仪, 用直接接触法进行超声波检测, 探头型号为 5P20Z。

2 结果与讨论

2.1 锻造工艺对大规格方坯显微组织的影响

3 种锻造工艺得到的 Ti-6Al-4V 合金大规格方坯的显微组织分别见图 2、图 3、图 4。铸锭经过单相区和两相区的热加工变形后, 原始 β 晶粒得到了充分破碎, 显微组织为 β 基体上均匀分布的不同尺寸的等轴 α 相组织, 初生 α 相含量约占 80% 左右。从形貌上看, 工艺 A 和 B 较工艺 C 的初生 α 相尺寸更为细小; 工艺 C 方坯组织中初生 α 相尺寸偏大, 局部存在未完全破碎的晶界 α 相以及大块 α 相, β 相中有转变的针状 α 相。A、B、C 3 种工艺均是先在 β 单相区进行开坯锻造, 并采用水冷方式进行冷却, 因此 β 相来不及通过扩散形成稳定的 α 相, 而是以切变方式进行相变, 保留了相对细小的 α 片层。这种片层组织不能通过热处理改变其形貌, 使其球化或者等轴化, 只能通过 $\alpha + \beta$ 两相区大变形实现, 应

变较小时，片层组织发生扭折，应变增大到一定程度后开始发生动态球化^[4-5]。进入 $\alpha + \beta$ 两相区变形后，工艺 A、B 的变形足够充分，满足使与横断面平行和垂直方向的片状 α 相充分变形的条件，原始晶粒充分破碎，球化过程进行的较充分，组织均匀性好。工艺 B 在 $\alpha + \beta$ 两相区变形中增加了一火 β 单

相区均匀化处理，由于 β 晶粒在单相区加热时长大非常迅速，容易形成连续的晶界 α 相，因此工艺 B 较工艺 A 的晶粒大^[6]。工艺 C 只进行了 10 火锻造，在单相区和 $\alpha + \beta$ 两相区变形不足，导致晶粒破碎不充分，晶粒粗大，球化过程不完全，形成的组织不均匀，心部存在长条及大块 α 相(图 4)。

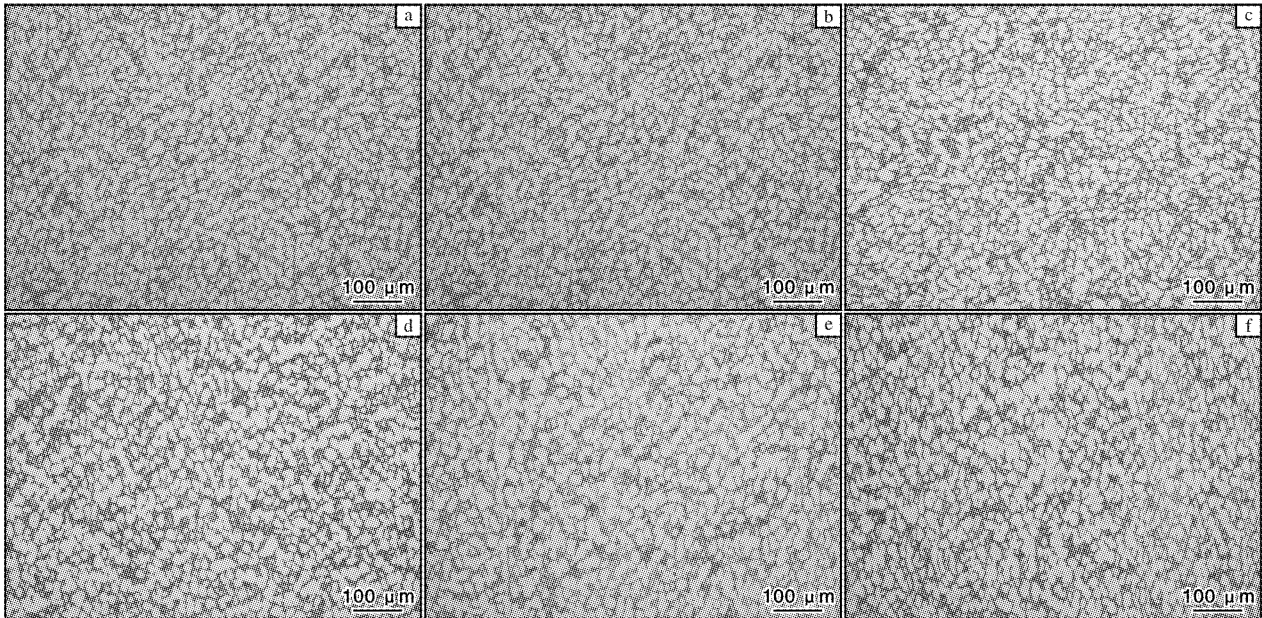


图 2 工艺 A 锻制的 Ti-6Al-4V 合金方坯的金相照片

Fig. 2 Metallographs of Ti-6Al-4V alloy forging billet produced by process A: (a) horizontal edge; (b) horizontal W/4; (c) horizontal heart; (d) vertical edge; (e) vertical W/4; (f) vertical heart

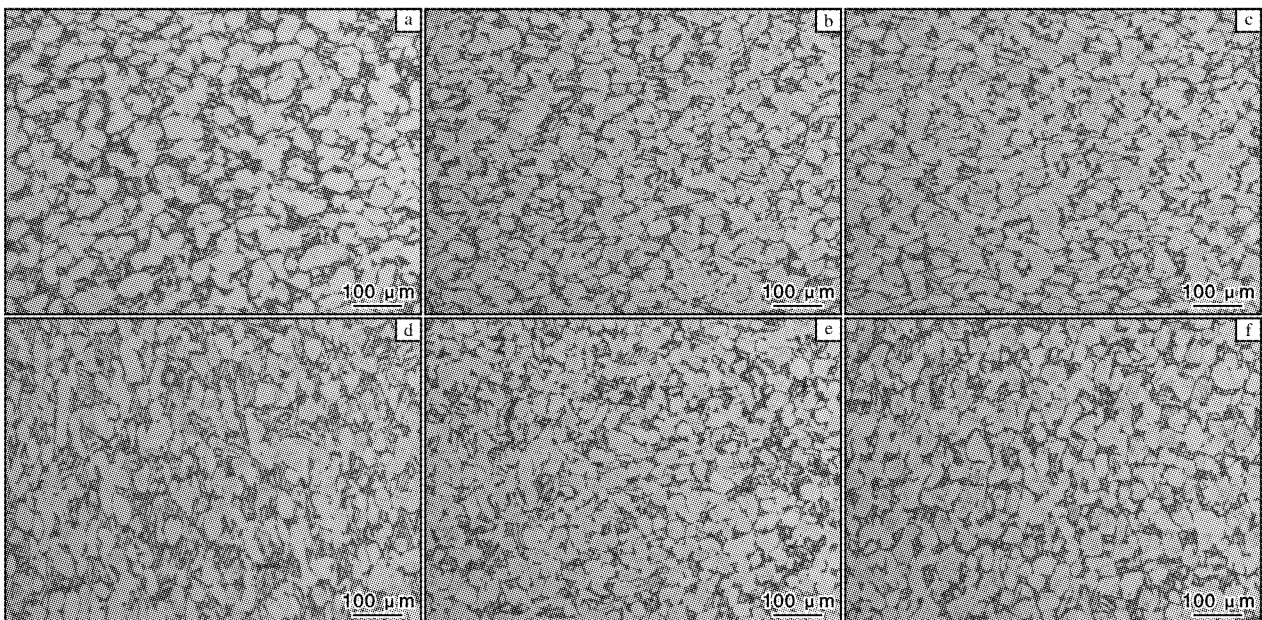


图 3 工艺 B 锻制的 Ti-6Al-4V 合金方坯的金相照片

Fig. 3 Metallographs of Ti-6Al-4V alloy forging billet produced by process B: (a) horizontal edge; (b) horizontal W/4; (c) horizontal heart; (d) vertical edge; (e) vertical W/4; (f) vertical heart

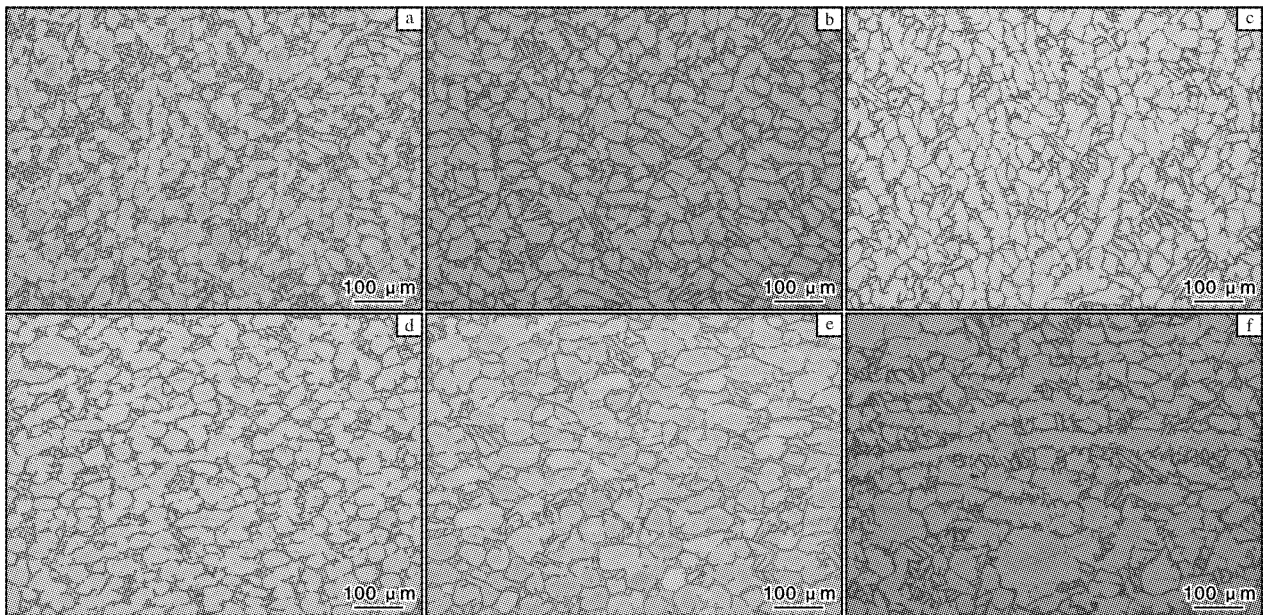


图4 工艺 C 锻制的 Ti-6Al-4V 合金方坯的金相照片

Fig. 4 Metallographs of Ti-6Al-4V alloy forging billet produced by process C: (a) horizontal edge; (b) horizontal W/4; (c) horizontal heart; (d) vertical edge; (e) vertical W/4; (f) vertical heart

2.2 锻造工艺对大规格方坯力学性能的影响

A、B、C 3 种工艺锻制的大规格方坯的力学性能见表 1。由表 1 可以看出, 3 种工艺锻制的 Ti-6Al-4V 合金大规格方坯的力学性能均满足 AMS 4928U 标准要求。工艺 A、B 的强度虽低于工艺 C, 但各方向差异较小, 均匀性更好, 且塑性明显高于工艺 C 的。这是由于工艺 A、B 均在单相区和两相区进行了大变形, 原始晶粒充分破碎, 动态再结晶充分, 球化过程充分, 组织均匀性好, 且强度与塑性匹配较好^[7-8]。工艺 C 方坯组织中有长条 α 相和针状次

表 1 不同工艺锻制的 Ti-6Al-4V 合金大规格方坯的室温力学性能

Table 1 Room temperature mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy large forging billets by different processes

	Sample direction	R_m /MPa	$R_{\text{p}0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
Process A	L	985	905	18.0	42.5
	LT	990	890	16.5	40.5
	ST	980	885	16.5	41.0
Process B	L	970	855	15.5	35.0
	LT	997	867	15.5	36.5
	ST	982	861	14.5	35.0
Process C	L	1 012	925	10.5	33.0
	LT	1 003	892	12.5	34.0
	ST	992	881.5	13.0	36.5
AMS 4928U	T/L	≥ 896	≥ 827	≥ 10	≥ 20

生 α 相存在, 使得材料在塑性变形时位错和滑移容易沿某一方向产生应力集中, 形成裂纹源, 引起材料强度升高, 塑性下降。

2.3 Ti-6Al-4V 大规格方坯超声波探伤

3 种工艺锻制的 Ti-6Al-4V 合金大规格方坯的超声波探伤结果见表 2, 探伤杂波图见图 5。由表 2 可以看出, 工艺 A、B 的杂波水平明显低于工艺 C。由图 5 可以看出, 工艺 A 的杂波最低, 工艺 B 次之, 工艺 C 的杂波明显高于工艺 A 和 B。杂波是组织不均匀性的反映^[9]。工艺 A、B 的超声波探伤杂波水平低, 反映出方坯的组织整体均匀性较好, 这也与图 2、图 3 结果相吻合。工艺 C 锻制的大规格方坯从边部到心部组织差异较大, 心部长条 α 相具有明显的方向性(图 4), 使得超声波沿该方向散射叠加, 从而产生较高的杂波^[10-11]。

表 2 Ti-6Al-4V 合金大规格方坯超声波探伤结果

Table 2 Ultrasonic testing results of Ti-6Al-4V alloy large forging billets

	Noise level in ultrasonic testing
Process A	$\phi 2.0$ mm - 12 dB
Process B	$\phi 2.0$ mm - 9 ~ - 12 dB
Process C	$\phi 2.0$ mm - 6 ~ - 9 dB
AMS 4928U	A level

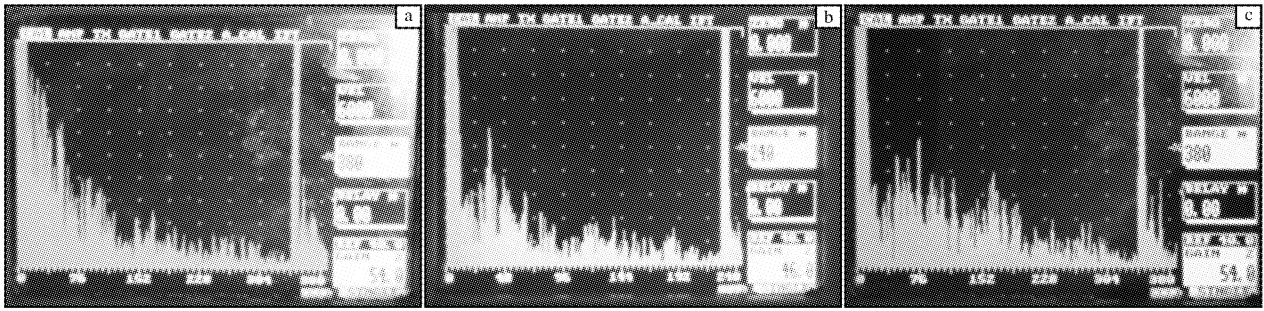


图 5 不同工艺锻制的 Ti-6Al-4V 合金大规格方坯的超声波探伤波形图

Fig. 5 Waveform of ultrasonic flaw detection of Ti-6Al-4V alloy large forging billets produced by different processes: (a) process A; (b) process B; (c) process C

3 结 论

(1) 采用全流程控制的 3 种工艺锻制出 245 mm × 480 mm × 3 700 mm 的 Ti-6Al-4V 合金大规格方坯，显微组织均为等轴组织，初生 α 相含量约占 80%。工艺 A、B 锻制的方坯组织细小，均匀性好，超声波杂波水平低。工艺 C 锻制的方坯晶粒尺寸粗大，组织不均匀，心部存在长条及大块状 α 相。

(2) 工艺 A、B 锻制的方坯有较好的强度和塑性匹配。工艺 C 的强度虽较高，但塑性相对较低。

(3) 从组织均匀性、力学性能及超声波杂波水平综合考虑，工艺 A 为最优锻造方案。

参考文献

- [1] 莱茵斯 C, 皮特尔斯 M. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 张丰收, 王凯旋, 雷锦文, 等. 某特殊需求的大规格 TC4 钛合金棒材制备工艺研究[J]. 钛工业进展, 2014, 31(3): 30-33.
- [3] 徐看, 吕彦明, 黄艳玲. 薄壁件锻造成形工艺及数值模拟技术研究[J]. 锻压技术, 2014, 39(2): 128-132.
- [4] 王小芳, 陈明和, 陈伟, 等. TC4-DT 钛合金高温热变形行为研究[J]. 航空材料学报, 2012, 32(1): 29-34.
- [5] 康少飏. 变形工艺参数对 TA2、TC4 钛合金组织性能影响的研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2015.
- [6] 赵永庆, 陈永楠, 张学敏, 等. 钛合金相变及热处理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012.
- [7] 稀有金属材料加工手册编写组. 稀有金属材料加工手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 447.
- [8] 汪波, 曾卫东, 彭雯雯. 不同锻造工艺对 TC4 钛合金棒材显微组织与力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2014, 31(5): 14-18.
- [9] 周水亮, 陶军, 赵海涛, 等. 晶粒尺寸对钛合金 TIG 焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2011, 31(5): 34-39.
- [10] 鞠岩. 大直径 TC4 钛合金铸锭冒口超声波探伤方法[J]. 钛工业进展, 2010, 28(3): 32-34.
- [11] 李华, 马英杰, 邱建科, 等. TC4 钛合金显微组织对超声波探伤杂波水平的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(9): 1859-1863.

国内外新闻

Arconic 公司开发出航空用新型高温钛合金

Arconic 公司宣布开发出一种航空用 ARCONIC-THOR 钛合金，并已获得商业许可。ARCONIC-THOR 是一种低成本的新型钛合金，可替代当前的镍基超合金。该钛合金比当前使用的镍基合金轻 50%，更适合用于高温航空发动机和相邻的结构件中。

与现有的高温合金相比，ARCONIC-THOR 钛合金的抗氧化性提高了 3 倍。这种良好的抗氧化性可以防止材料在高温时受损，其工作温度高于现有的常规钛合金。ARCONIC-THOR 钛合金可用于生产板材、箔材、轧制环、锻件和挤压件等，具有良好的成形性。

(王运锋编译自 forgingmagazine.com)