

双重退火热处理对TC6锻造叶片组织和性能的影响

The Effect of Dual Annealing Heat Treatment on the Microstructure and Properties of TC6 Forged Blades

■ 杨涛 尹奏凯 丁屹墀 / 中国航发贵州黎阳航空动力有限公司

钛合金作为航空发动机上的关键结构材料，广泛应用于压气机叶片、机匣等承力构件中。钛合金零部件制造中的双重退火工艺较传统的等温退火工艺有较为明显的组织性能调控作用，能显著提升构件的综合力学性能。

航空发动机上采用的TC6钛合金属于 $\alpha+\beta$ 双相钛合金^[1]，适合在400~500℃的环境中使用，具有较好的综合力学性能，且可热处理强化，主要用来制造压气机叶片、盘件等。等温退火工艺在TC6钛合金锻造叶片的锻后热处理应用较为广泛，但等温处理往往由于较高的保温温度及热处理阶段之间降温速率较低，造成 β 相充分分解^[2-3]，虽使得TC6钛合金得到了较高的塑性、热稳定性，但由于TC6钛合金中 β 稳定元素较少，相应的强度有所降低。本文基于TC6的组织及元素组成，采用双重退火热处理工艺对叶片的锻后组织性能进行了调控，为改进TC6钛合金锻造叶片的热处理工艺提供参考。

试验材料和方法

试验所用钛合金叶片为TC6锻后未热处理的风扇转子叶片，分4组采用真空热处理炉分别进行相应的等温退火热处理和双重退火热处理。其中S1组进行典型的等温退火热处理，S2、S3、S4组进行第一阶段温度递

减的双重退火热处理（第一阶段分别保温880℃、840℃、810℃，第二阶段温度加热至高于第一阶段）。

从叶身中心部位切取金相试样，分别经过400#、800#、1200#、2000#砂纸逐级打磨和机械抛光处理后，采用HF:HNO₃:H₂O=1:2:50体积比的溶液腐蚀10s，利用光学显微镜观察组织形貌，并统计晶粒尺寸和分析组织或相构成。根据试验标准制备标准拉伸试样，并采用万能试验机进行室温及高温力学性能测试。硬度测试采用布氏硬度计，载荷砝码500g保压10s，测试面需打磨光滑。此外，进行了冲击试验和疲劳试验。

试验结果

基于数理统计的诊断方法，通过对过程数据统计量的分析，利用频谱、小波变换、概率密度、回归拟合、相关函数等数据处理模型，直接提取测量参数（包括时域、频域、时频域等），进而可以从其变化中提取特征，针对特定的变量设定特定的门限值来检测异常。基于数理统计的故障诊断方法故障判据较为清晰、

故障判断准则建立相对容易。

等温退火和双重退火对叶片显微组织的影响

TC6钛合金锻造叶片经第一阶段保温温度为880℃的等温退火后，典型的锻后纤维组织状态发生明显转变^[3]，较多的初生 α 相转变为 β 相，如图1所示。经完整的等温退火热处理后，从图1(a)中可以明确观察到初生 α 相相对较多^[4]，面积比达到67.5%， β 转组织中次生 α 相呈等轴状和短棒状不均匀分布。这主要是由于880℃保温后，等温退火第一阶段热处理后的冷却速率相对双重退火较低。一方面， β 相有足够的时间和温度较多转变为初生 α 相；另一方面，较低的冷却速率使得次生 α 相形成的驱动力相对减小，这不足以支撑次生 α 相以编织状长条形态^[5-6]形成，而得到一定程度上等轴状^[7]长大的次生 α 相。但从图1(b)中可以发现，由于双重退火第一阶段后较快的冷却速率， β 相来不及充分转变为 α 相。初生 α 相则相对较少，面积比仅为47.5%。此外，双重退火热处理之后 β 转组织中多为交

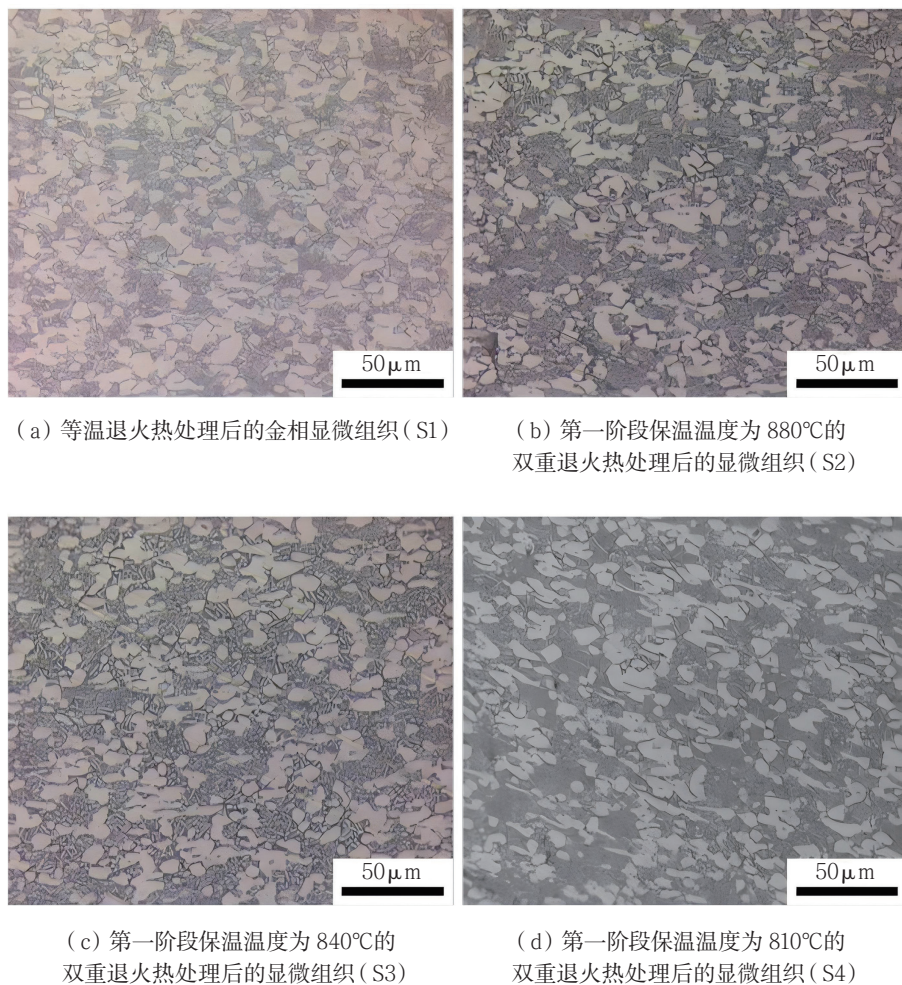


图1 等温退火和双重退火对叶片显微组织的影响

又编织状的细长条状二次 α 相。这主要是由于双重退火第一阶段保温后的冷却速度不低，次生 α 相有足够的动力形成针状长条形。其中，也存在更为细小且针片状的三次 α 相。

从图1(c)中可以观察到，随着双重退火热处理第一阶段保温温度的逐渐降低，初生 α 相含量相对增多，面积比达到57.5%。这主要是由于840°C相对于 β 相变点温度进一步降低，叶片锻后的 α 相在第一阶段保温时并未较多地转变为 β 相。而且TC6钛合金锻造叶片锻后

热处理期间不完全再结晶^[8-9]，第一阶段保温后较快的冷却速度，使得 β 转组织中的针片状次生 α 相的片层变薄变细且不能完全占据整个 β 转组织。

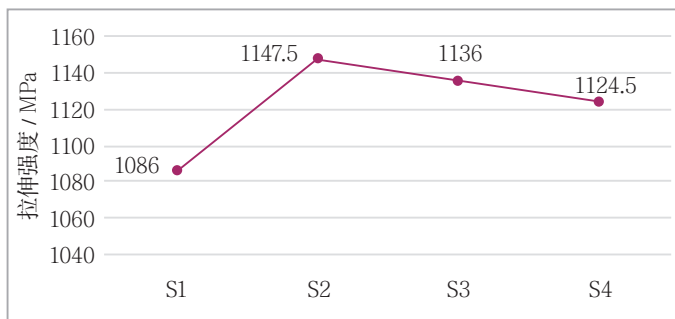
从图1(d)中可以发现，随着双重退火热处理第一阶段保温温度降低到810°C时，初生 α 相相对含量达到52.5%，这主要也是由于锻后组织在第一阶段保温期间， α 相更少且不完全向 β 相转变所得。这可以从图中细长且带状延伸的初生 α 相形态得到。 β 转组织中片层状交叉编织的次生 α 相分布更为团聚

且细小，很难被清楚地观察到。这主要归因于第一阶段远离 β 相变点的保温温度和较快的冷却速率。因此，对比可知，以880°C为双重退火第一阶段保温温度的双重退火热处理工艺得到的初生 α 相相对含量达47.5%且较均匀分布， β 转组织中交叉编织状的细长条二次 α 相形态，为较为理想的TC6钛合金锻造叶片锻后热处理组织状态。

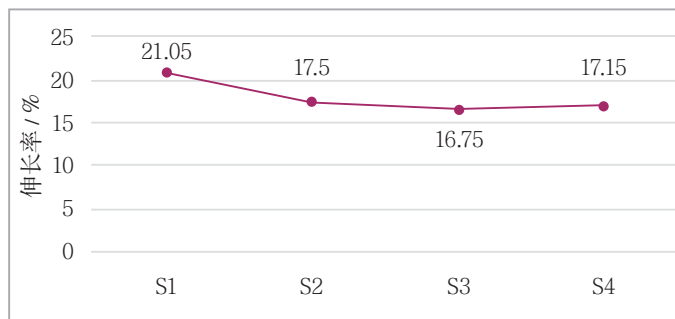
等温退火和双重退火对叶片拉伸力学性能的影响

相比于等温退火热处理，TC6钛合金锻造叶片经S2组双重退火热处理后室温及高温拉伸强度分别升高5.7%和5.3%，达到了1147.5MPa和862MPa(见图2)。但相应的塑性指标断后伸长率分别下降16.8%和14.4%。

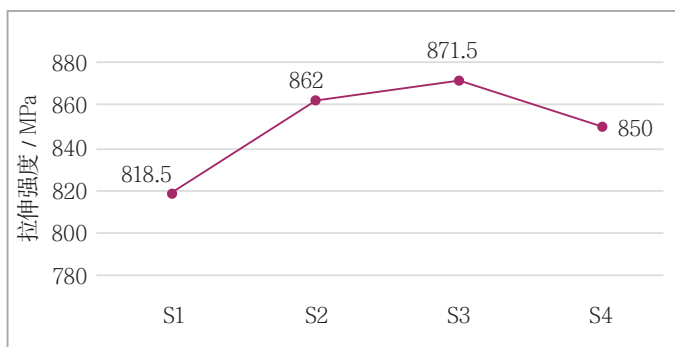
从图2中还可以发现，随着双重退火热处理过程第一阶段保温温度从880°C逐级减低到810°C，TC6钛合金锻造叶片双重退火热处理后的室温拉伸强度逐渐降低，室温塑性亦逐渐降低。但高温拉伸强度呈先上升后下降的趋势，而高温塑性反而呈先下降后上升的变化趋势。这主要是由于双重退火热处理过程第一阶段保温温度较高(880°C)，且出炉空冷较快的冷却速率产生了较大的过冷度，这促进了 β 转组织快速大量且编织状的形成。当双重退火第一阶段保温温度降低为840°C时， α 相不完全转变为 β 相，且第一阶段后的冷却过程过冷度减小。使得较多的 β 相转变为初生 α 相。当第一阶段保温温度降低到810°C时，初生 α 相不完全转变为 β 相，且第一阶段保温后冷却过程中更少的 β 相转变为初生 α 相。这种组织



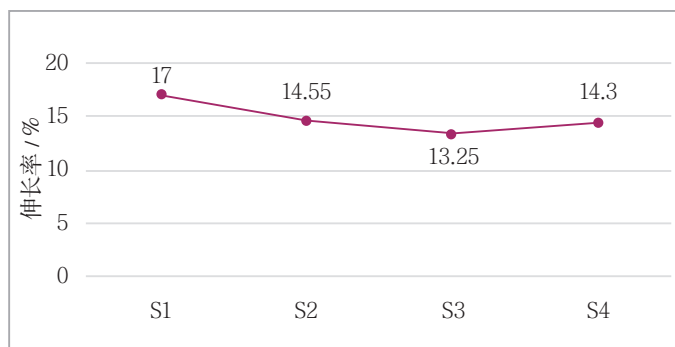
(a) 4组热处理叶片的室温拉伸强度



(b) 4组热处理叶片的室温断后伸长率



(c) 4组热处理叶片的高温拉伸强度



(d) 4组热处理叶片的高温断后伸长率

图2 等温退火和双重退火对叶片拉伸力学性能的影响

转变结果最终使得高温强度出现了较为明显的先升后降的趋势。

等温退火和双重退火对叶片疲劳性能的影响

如图3所示，相比S1组等温退火，S2组室温冲击性能和疲劳性能下降明显，分别下降23.2%和

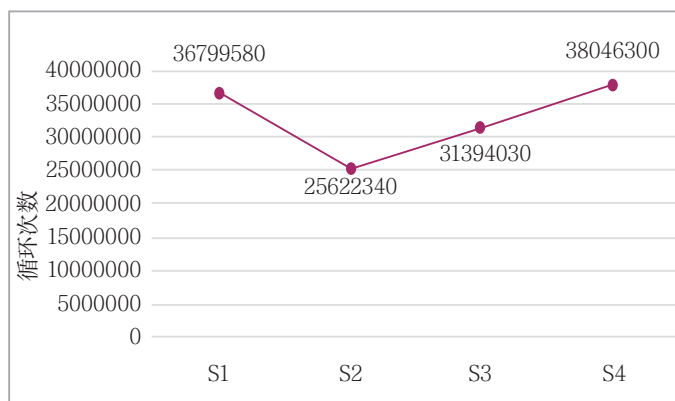
30.4%。这主要是由于 α 相含量显著降低29.6%，此外，相对粗大的初生 α 相及一定比例呈等轴状和层片状次生 α 相的组织匹配状态，共同保持了TC6钛合金锻造叶片等温退火后高的抗裂纹扩展性。相较双重退火，等温退火热处理后叶片达到

了较高的室温及高温塑性，这也一定程度上增强了叶片的疲劳寿命。

当双重退火热处理第一阶段保温温度逐级递减时，TC6钛合金锻造叶片热处理后的室温抗冲击性能和疲劳寿命呈递增趋势。一方面，这主要得益于随着第一阶段保温温



(a) 4组热处理叶片的室温冲击性能



(b) 4组热处理叶片的疲劳寿命

图3 等温退火和双重退火对叶片疲劳性能的影响

度逐级降低并远离 β 相转变点温度时, 第一阶段保温处理后叶片中未完全转变为 β 相的 α 相逐渐增多, 而第二阶段保温不足以发生相转变, 其本质为时效热处理, α 相逐渐增多有助于提升叶片的室温冲击性能及疲劳性能; 另一方面, 交叉编织状的细长条次生 α 相团簇尺寸减小、次生 α 相聚集中层片厚度减小, 共同促成了第一阶段温度逐级降低的双重退火热处理的抗室温冲击性能和疲劳寿命的递增趋势。

结果分析总结

第一阶段保温温度为 880°C 的双重退火热处理相较等温退火热处理, 可以提升强度指标, 但室温和高温塑性指标都有所下降。这是由于双重退火后初生 α 相相对含量减少, 而 β 相分解为 α 相有助于提升 TC6 钛合金的塑性。双重退火热处理后 β 转组织中交叉编织状的细长条二次 α 相及残余 β 相也在一定程度上提升了叶片强度。

随着双重退火第一阶段保温温度的逐级降低, TC6 钛合金锻造叶片双重退火热处理后的强度指标呈下降趋势, 但塑性指标的下降趋势不明显。这归因于未转变初生 α 相逐渐增多, 使得叶片强度减小, 塑性升高。又随着第一阶段保温温度降低, 锻后组织再结晶程度减小, 晶粒细化程度减小, 材料塑性降低。此外, β 转组织中交叉编织的层片状次生 α 相团簇尺寸减小, 层片变薄, 使强度提高, 但带状分布的初生 α 相未完全转变较多, 导致叶片强度下降显著。

双重退火热处理的第二阶段热处理, 其本质为时效处理, 这有助于强化相在晶内或晶界上析出, 促

进双重退火热处理后叶片的综合力学性能。同时, 此阶段晶粒长大不显著。

结束语

本研究采用双重退火热处理工艺对叶片的锻后组织性能进行了调控, 有效地优化了 α 相和 β 相及次生 α 相的体积配比, 提高了 TC6 钛合金锻造叶片热处理后的综合力学性能, 后续将更加深入研究其在压气机叶片制造中的应用。

航空动力

(杨涛, 中国航发贵州黎阳航空动力有限公司, 助理工程师, 主要从事金属形变热处理及表面处理研究)

参考文献

- [1] XU W, BRANDT M, SUN S, et al. Additive manufacturing of strong and ductile Ti-6Al-4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition[J]. Acta Materialia, 2018, 85(53): 74-84.
- [2] YUAN W, HOU W, LI S, et al. Heat treatment enhancing the compressive fatigue properties of open-cellular Ti-6Al-4V alloy prototypes fabricated by electron beam melting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 21(11): 112-117.
- [3] ZHANG S, MA Y, HUANG S, et al. Temperature-gradient induced microstructure evolution in heat-affected zone of electron beam welded Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 38(9): 336-359.
- [4] CAO S, MA Y, HUANG A, et al.

- Static coarsening behaviour of lamellar microstructure in selective laser melted Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 33(51): 227-256.
- [5] NING Y Q, XIE B C, LIANG H Q, et al. Dynamic softening behavior of TC18 titanium alloy during hot deformation[J]. Materials and Design, 2015, 71(11): 68-77.
- [6] MATSUMOTO H, KITAMURA M, LI Y, et al. Hot forging characteristic of Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr alloy with single metastable β microstructure[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, A611: 337-344.
- [7] ABBASI S M, MOMENI A, LIN Y C, et al. Dynamic softening mechanism in Ti-13V-11Cr-3Al beta Ti alloy during hot compressive deformation[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 25(67): 337-344.
- [8] HUA M, DONG L, ZHANG Z, et al. Effects of multi-pass drawing strain and heat treatment on microstructure, texture and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 757(21): 337-344.
- [9] ZOU Z, SIMONELLI M, KATRIB J, et al. Effects of multi-pass drawing strain and heat treatment on microstructure, texture and mechanic properties of Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2021, 814(21): 113-124.